

Trabajo de Fin de Grado

## Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

### Análisis de viabilidad de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva en SEAT

#### MEMORIA

**Autor:** Jorge Campodarve Montero  
**Director:** Mario Martínez Díaz  
**Ponente:** Xavier Ramis Juan  
**Convocatoria:** Junio 2020



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resumen

El presente proyecto pretende analizar la viabilidad de introducir piezas, obtenidas mediante tecnología de fabricación aditiva, en vehículos de la empresa automovilística SEAT.

La fabricación aditiva abarca un conjunto de tecnologías que tienen como fin fabricar objetos tridimensionales creados a partir de la superposición de capas de material. Hasta el momento, la mayoría de las empresas de la industria automovilística únicamente utilizan esta tecnología para generar prototipos de piezas. En la actualidad, se considera que ciertas tecnologías de fabricación aditiva han evolucionado lo suficiente como para competir, en algunos procesos, con la tecnología tradicional de molde de inyección. Sobre todo, en procesos donde el volumen de unidades que se deben producir es bajo, puesto que en estos casos la fabricación tradicional de molde de inyección resulta sumamente cara. Por esta razón, se pretende analizar la viabilidad de introducir piezas de fabricación aditiva en vehículos de serie corta, es decir, en variantes de modelos de coche que tienen muy pocas unidades a la venta, alrededor de 10.000.

En primer lugar, se introduce el proyecto explicando el origen, la motivación, los objetivos y el alcance de este. A continuación, se define la fabricación aditiva en términos generales, se exponen los diferentes tipos de fabricación aditiva disponibles en la actualidad y los que están en desarrollo. También se describen los materiales que se pueden utilizar y se realiza un estudio de viabilidad económica orientado a la industria de la automoción.

Posteriormente, al trabajo se centra en analizar las ventajas, limitaciones y oportunidades que supone la obtención de piezas mediante fabricación aditiva para ser introducidas en vehículos de la empresa SEAT. Se investiga que tipos de tecnologías y materiales son los adecuados para fabricar piezas que cumplan los requisitos necesarios para ser aptas para un vehículo.

Una vez seleccionados los tipos de tecnología y materiales adecuados, se aplican los conceptos expuestos anteriormente de forma práctica. Se eligen dos piezas ya existentes en la marca y se adaptan para ser fabricadas mediante las tecnologías multi jet fusión (MJF) y sinterizado selectivo por láser (SLA). A estas piezas se les realizan ensayos de vibración, para comprobar si disponen de los requisitos mecánicos necesarios para ser homologables. Luego, se analiza si ambas piezas son viables económicamente, comparando la tecnología de fabricación aditiva con la de molde de inyección.

Se comprueba que la tecnología MJF es más rentable que la tecnología de molde de inyección para piezas de tamaño reducido y con un volumen de tirada inferior a 11.000 unidades.

Por último, se investiga el posible impacto de la implantación de esta tecnología en SEAT y se realiza un presupuesto del proyecto. También se introduce el concepto de diseño generativo.



# Sumario

<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>5</b>
<b>1. LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS</b>	<b>7</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
2.1. Origen del proyecto .....	9
2.2. Motivación .....	10
2.3. Objetivos del proyecto .....	10
2.4. Alcance del proyecto .....	11
<b>3. TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN ADITIVA</b>	<b>13</b>
3.1. Introducción a la tecnología de fabricación aditiva .....	13
3.2. Diseño y desarrollo de piezas para fabricación aditiva .....	14
3.3. Tipos de tecnologías de fabricación aditiva disponibles .....	18
3.4. Tipos de tecnologías de fabricación aditiva en desarrollo .....	24
3.5. Materiales para la tecnología de fabricación aditiva .....	27
3.5.1. Materiales para tecnología de molde de inyección .....	27
3.5.2. Materiales para la fabricación aditiva .....	30
3.5.3. Comparativa entre materiales para ambas tecnologías .....	32
3.6. Viabilidad económica .....	36
3.6.1. Análisis de costes de fabricación aditiva .....	36
3.6.2. Comparativa con molde de inyección .....	40
<b>4. IMPLANTACIÓN DE FABRICACIÓN ADITIVA EN SEAT</b>	<b>44</b>
4.1. Ventajas y limitaciones .....	44
4.2. Oportunidades actuales y de futuro en SEAT .....	45
4.3. Preselección de la tecnología de fabricación aditiva .....	46
4.4. Requisitos que debe cumplir una pieza: BMG .....	46
4.5. Metodología de ensayos de vibración .....	47
<b>5. ESTUDIO DE VIABILIDAD DE PIEZAS EN SEAT</b>	<b>49</b>
5.1. Customización de piezas en SEAT .....	50
5.1.1. Personalización de la llave del vehículo .....	50
5.1.2. Personalización de la bandeja de la consola .....	51
5.2. Soporte VIP Pedal: .....	52
5.2.1. Proceso de desarrollo .....	53

5.2.2.	Proceso de fabricación.....	54
5.2.3.	Prueba de vibración de soporte VIP Pedal para validación BMG .....	56
5.2.4.	Análisis económico de fabricación de soporte VIP Pedal.....	59
5.3.	Soporte E-noise .....	66
5.3.1.	Proceso de desarrollo .....	67
5.3.2.	Análisis económico de fabricación de soporte E-noise .....	67
5.4.	Comparativa entre el tamaño de la pieza y el coste unitario .....	72
<b>6.</b>	<b>IMPACTO DEL PROYECTO EN SEAT .....</b>	<b>75</b>
6.1.	Impacto ambiental.....	75
6.1.1.	Política medioambiental de SEAT.....	75
6.1.2.	Impacto ambiental del proyecto .....	75
6.2.	Impacto en la fábrica de SEAT y proveedores .....	77
<b>7.</b>	<b>PRESUPUESTO DEL PROYECTO .....</b>	<b>79</b>
<b>8.</b>	<b>DISEÑO GENERATIVO .....</b>	<b>80</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>82</b>
	<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>84</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>85</b>
	Referencias bibliográficas .....	85
	Bibliografía complementaria .....	87

# 1. Lista de abreviaturas y símbolos

**ABS:** Acrilonitrilo butadieno estireno

**BJ:** Inyección aglutinante (*Binder jetting*)

**BMG:** Documento de aprobación de tipo de diseño (*Baumustergenehmigung*)

**CAD:** Diseño asistido por computadora (*Computer-aided design*)

**CPD:** Centro de prototipos en desarrollo

**CUPRA:** Es el acrónimo de CUP-Racing. Corresponde a una marca derivada de SEAT

**DLMD:** Deposición directa de metal con láser (*Direct laser metal deposition*)

**DMLS:** Sinterizado directo por láser de metal (*Direct metal laser sintering*)

**DOD:** Tecnología de deposición de gota bajo demanda (*Drop on demand*)

**EPX:** Epoxy

**FDM:** Modelado por deposición fundida (*Fused deposition modeling*)

**FEM:** Método de elementos finitos (*Finite element method*)

**HDT:** Temperatura de deformación al calor (*Heat deflection temperature*)

**MJ:** Tecnología de inyección de material (*Material jetting*)

**MJF:** Multi jet fusion (*Multi Jet Fusion*)

**PA:** Poliamidas

**PA11:** Poliamida 11

**PA12:** Poliamida 12

**PA12 GB:** Poliamida 12 con carga de vidrio

**PC:** Policarbonato (*Polycarbonates*)

**PE:** Polietileno (*Polyethylene*)

**PLA:** Ácido poliláctico

**POM:** Polioximetileno (*Polyoxymethylene*)

**PP GF:** Polipropileno con fibra de vidrio

**PP:** Polipropileno

**PS:** Poliestireno (*Polystyrene*)

**PVC:** Policloruro de vinilo (*Polyvinyl chloride*)

**RPU:** Poliuretano rígido (Rigid Polyurethane)

**SEAT:** Sociedad Española de Automóviles de Turismo

**SLA:** Estereolitografía (*Stereolithography*)

**SLM:** *Selective Laser Melting*

**SLS:** Sinterizado selectivo por láser (*Selective laser sintering*)

**UV:** Ultravioleta

**VW:** Volkswagen





## 2. Introducción

### 2.1. Origen del proyecto

El proceso de evolución tecnológica en el que se encuentra la humanidad desde sus orígenes tiene como objetivo transformar el entorno desde el punto de vista científico y social para adaptarse mejor a las necesidades y los deseos humanos.

La lista de nuevas tecnologías crece cada día. Algunas como la inteligencia artificial, nanotecnología, robótica, realidad aumentada o fabricación aditiva tienen la capacidad de facilitar la vida de los individuos y mejorar sus relaciones personales y laborales. En particular, la tecnología de fabricación aditiva es considerada la tecnología del futuro para el sector industrial. Permite la fabricación de objetos tridimensionales complejos mediante un proceso rápido y económico.

Para la realización de este proyecto se considera la situación laboral del autor: participa en un programa de prácticas en el centro técnico de la empresa automovilística SEAT. Los trabajadores de este centro se dedican a actividades de Investigación y Desarrollo (I+D). Estudian la posibilidad de introducir novedades en los vehículos fabricados por la empresa con el ánimo de mejorar la experiencia del cliente.

A principios de 2019, en el centro técnico de SEAT, se inició un proyecto de innovación. Dicho proyecto se creó con el ánimo de introducir el mundo de la tecnología de fabricación aditiva en el sector automovilístico. Uno de los objetivos del proyecto de innovación es analizar y conocer las posibles ventajas que puede aportar, así como las limitaciones que tiene esta tecnología hoy en día.

Concretamente, en el departamento de desarrollo de componentes eléctricos del vehículo, donde trabaja el autor, se consideró que este tipo de tecnología podía tener aplicaciones prácticas reales para las piezas que diseñan. De esta forma surgió un nuevo proyecto en el departamento, con la intención de analizar si es viable fabricar piezas que se desarrollan en la sección de eléctricos, mediante fabricación aditiva. Se trata de piezas de plástico que actúan como soportes para centralitas del sistema eléctrico del vehículo.

## 2.2. Motivación

La motivación para realizar este proyecto surge de la unión de varios sucesos. El primero, es la oportunidad que se le ha dado al autor, estudiante del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, para realizar prácticas en la empresa SEAT, una de las más importantes en el sector automovilístico y que más apuesta por la investigación y desarrollo.

El segundo, es la intención de la empresa de conocer y analizar la tecnología de fabricación aditiva para comprobar si es realmente viable. Esta intencionalidad se denota en el momento en que la empresa crea un proyecto de innovación donde se dedican todos los recursos en la investigación de esta tecnología. Además, el departamento donde el autor está realizando sus prácticas de empresa participa en este proyecto de innovación.

Por último, la motivación del autor del proyecto para conocer e investigar una tecnología que está en continuo desarrollo. Cada año evoluciona, surgen nuevos tipos de fabricación aditiva, nuevas máquinas y se usan nuevos materiales. Es atractivo el hecho de trabajar con una tecnología que se encuentra en plena fase de desarrollo. Es un campo de investigación donde hay mucho margen de mejora.

Otro de los factores que ha influido en la decisión de realizar este proyecto es conocer que la fabricación aditiva empieza a obtener resultados aceptables en cuanto a calidad-precio para la fabricación de piezas de plástico.

## 2.3. Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene como objetivo estudiar la viabilidad de introducir piezas obtenidas mediante fabricación aditiva en vehículos de serie corta de la empresa automovilística SEAT. Se trabaja con dos piezas concretas del vehículo: soporte VIP Pedal y soporte E-noise. Dichas piezas son de distinto tamaño y con funcionalidades diferentes, de esta forma el campo de estudio es más amplio.

Un objetivo secundario, derivado de la intención principal del proyecto, es el conocimiento en profundidad de las ventajas y posibilidades que pueda aportar esta tecnología para la industria automovilística. Así como los inconvenientes y limitaciones actuales.

Un tercer objetivo es la clasificación de materiales para los distintos tipos de fabricación aditiva según sus propiedades mecánicas. Posteriormente se comparan con los materiales plásticos más utilizados en la actualidad.

## 2.4. Alcance del proyecto

Para llegar a alcanzar el objetivo principal del proyecto se ha seguido una serie de pautas. Inicialmente, ha sido necesario conocer el funcionamiento de la empresa: métodos de trabajo, proyectos en los que está implicado el departamento de desarrollo eléctrico, *plannings* y calendarios de lanzamiento. Después, trabajando dentro del proyecto de innovación de SEAT, se ha realizado un amplio estudio comparando todos los tipos de tecnologías de fabricación aditiva disponibles, y de los materiales utilizados en cada una de ellas. Posteriormente, se ha observado si las características mecánicas de las piezas producidas mediante fabricación aditiva cumplen los requisitos mecánicos necesarios. Para ello, se ha realizado ensayos de vibración a estas piezas según las normas de verificación establecidas por el consorcio.

A continuación, se ha analizado la viabilidad económica de fabricar piezas mediante distintos tipos de fabricación aditiva. En este estudio se muestra cómo varía el coste unitario de las piezas en función del tamaño de estas y el volumen de tirada previsto.

### Localización del proyecto

Respecto a la localización del proyecto, este se realiza en el Centro Técnico de SEAT, concretamente en el departamento de desarrollo de componentes eléctricos. Este recinto es contiguo a la Fábrica de SEAT, situada en el kilómetro 585 de la autovía A-2, en el municipio de Martorell <sup>[1]</sup>.

Es una de las fábricas más modernas de Europa. Ocupa una superficie de más de 2.800.000m<sup>2</sup>. Está compuesta por un total de 12 talleres y un conjunto de edificios adyacentes: el Centro Técnico, el Centro de Recambios Originales de SEAT, el edificio de SEAT Sport y el edificio de CUPRA. Tiene una capacidad de producción de 2.100 unidades al día, lo que equivale aproximadamente a fabricar un coche cada 40 segundos.



Fig. 2.4 Vista aérea de la fábrica de SEAT en Martorell.

La empresa SEAT fue pionera en España en aplicar el concepto de producción conocido como *just in time*. Consiste en la idea de producir los costes bajo demanda. Alrededor de las instalaciones de fábrica hay un parque industrial de proveedores que asisten día a día a la fábrica. De esta forma desaparece la necesidad de tener un espacio para guardar el stock. Una vez sale un coche de la línea de producción se manda directamente a su lugar de pedido ya sea mediante camiones o por la vía de trenes que llega directamente al puerto.

En 1950 la empresa: Sociedad Española de Automóviles de Turismo es fundada<sup>[2]</sup>. Ese año empezó la producción en la Zona Franca de Barcelona. El año 1957 se convertiría en un símbolo de la industria automovilística española con el lanzamiento del modelo SEAT 600. Años después, en 1963, la producción se eleva 47.000 coches/año. Coincidiendo con la presentación del SEAT 1500. A finales de la misma década, el año 1968, se presenta el SEAT 124, alcanzando el millón de coches fabricados. En 1973 se empieza a construir el Centro Técnico en Martorell. Años más tarde, en 1990 Volkswagen adquiere el 99,99% de las acciones de SEAT. No fue hasta 1993 que se inaugura la planta de Martorell. Lo que supuso un antes y un después en la capacidad productiva de la marca. En 2005, la marca experimenta un importante aumento en el número de ventas gracias a la gran acogida del último modelo presentado. El SEAT León. La marca logra por segundo año consecutivo ser la más vendida en España en 2019. Siendo el SEAT León el modelo más vendido con un total de 34.000 matriculaciones.

En vistas al futuro a medio y largo plazo, la compañía apuesta por la movilidad de forma ecológica. Para conseguirlo, la marca ha presentado varias soluciones cero emisiones; scooter eléctrico (EXS KickScooter), moto eléctrica (e-Scooter), dos vehículos eléctricos (SEAT el Born y Mii electric) junto a un servicio de *carsharing* para reducir emisiones en grandes ciudades (Madrid y Hospitalet de Llobregat).

### **3. Tecnología de fabricación aditiva**

#### **3.1. Introducción a la tecnología de fabricación aditiva**

La tecnología de fabricación aditiva consiste en crear una pieza tridimensional a partir de la superposición de capas de material según un plano digitalizado. Este proceso es también conocido, de forma coloquial, como impresión 3D.

El origen de esta tecnología es relativamente reciente. En 1976 surge la idea de crear un objeto tridimensional a partir de capas de material, pero no se crea la primera máquina de impresión 3D hasta 1984. En ese año Charles Hull, cofundador de 3D Systems, desarrolló uno de los tipos de tecnología de fabricación por adición de material plástico más conocidos hoy en día, la estereolitografía (SLA). En 1988 Carl Deckard de la Universidad de Texas presentó la patente para la tecnología de sinterizado selectivo por láser (SLS), que utiliza la fusión de polvo mediante un láser para crear las capas del objeto. En 2009 la patente de la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM) caducó, lo que provocó que un gran número de empresas entraran al mercado. Esto hizo que los precios de las máquinas de este tipo de tecnología bajaran y que fuesen más accesibles. Durante los últimos tres años, la inversión en la mejora de técnicas de impresión y el abaratamiento del material han permitido llevar este tipo de tecnología al mundo industrial. Por ejemplo, Airbus ha introducido un conjunto de piezas fabricadas con esta tecnología en sus últimos aviones.

Esta tecnología permite utilizar una amplia variedad de materiales para crear piezas. Se puede fabricar mediante materiales plásticos, metálicos e incluso fibra de carbono. Los materiales más desarrollados para la impresión 3D son materiales plásticos, actualmente se pueden encontrar hasta 35 tipos diferentes. La fabricación mediante metales está en auge, pero aún se encuentra en fase de desarrollo. En cambio, la fabricación con fibra de carbono ya está en las primeras fases de aplicación. Actualmente la fabricación aditiva tiene aplicaciones prácticas en varios sectores como en biomedicina, automoción, industria aeroespacial o arquitectura.

La fabricación por adición engloba varios tipos de tecnologías que comparten el mismo principio, crear una pieza capa por capa. Principalmente se diferencian por el material utilizado y por la forma de fundir este material para crear cada capa.

El mercado de la impresión 3D está en continuo ascenso, en 7 años la inversión se ha multiplicado por cuatro y la previsión es que continúe creciendo. Actualmente, ya existen empresas proveedoras de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva. De esta forma se evita la inversión en maquinaria por parte de la empresa y permite que la fabricación de piezas mediante este método sea económicamente variable.

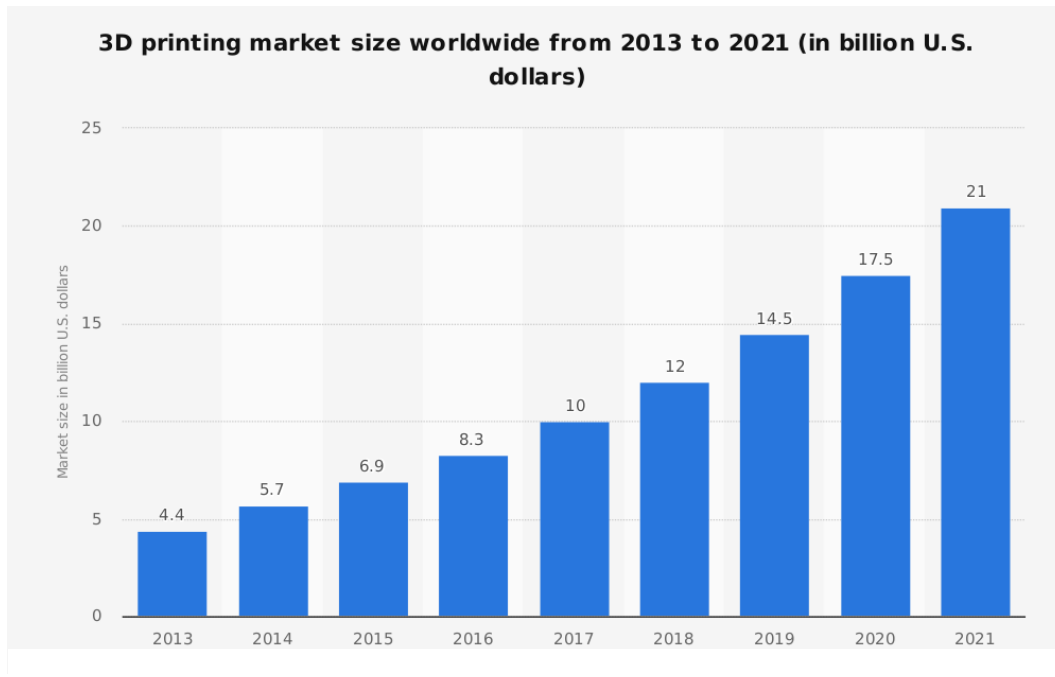


Fig. 3.1 Holst, A. (2020). Estimación del volumen de mercado de impresión 3D entre 2013 y 2021. Recuperado de [www.statista.com](http://www.statista.com) <sup>[3]</sup>

## 3.2. Diseño y desarrollo de piezas para fabricación aditiva

La utilización de una nueva tecnología de fabricación implica nuevas formas de diseño y desarrollo de piezas. Existe una gran diferencia entre los factores y las limitaciones que se deben tener en cuenta en el diseño de piezas para ser fabricadas con tecnologías tradicionales y para ser obtenidas con fabricación aditiva.

A continuación, se muestran los parámetros y limitaciones que existen en el diseño y desarrollo de piezas con tecnologías tradicionales como es el caso de la fabricación por molde de inyección. Seguidamente, se exponen los nuevos factores que se deben contemplar para piezas de impresión 3D. Por último, se muestra una nueva metodología de diseño que únicamente es viable para piezas obtenidas por fabricación aditiva, el diseño generativo.

## Diseño y desarrollo de piezas en la actualidad

Hasta el momento, en la industria del automóvil, la mayor parte de piezas de plástico se han producido a partir del método de molde de inyección. En la fase de diseño de piezas que se van a obtener mediante este método de fabricación se debe tener en cuenta las restricciones derivadas de utilizar moldes.

En primer lugar, se deben respetar los ángulos y la dirección de desmoldeo. Posteriormente considerar si, por la geometría de la pieza, es necesario el uso de correderas. También es indispensable analizar donde se sitúan las líneas de partage y tener en cuenta la refrigeración del molde.

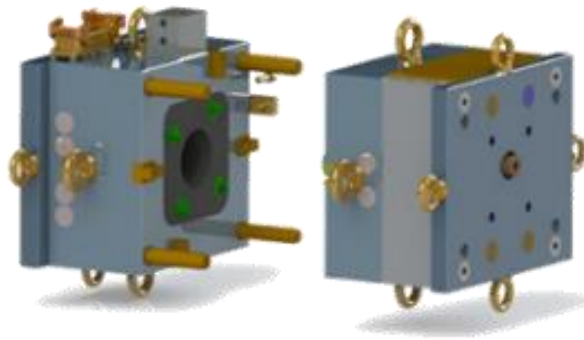


Fig. 3.2.a Molde de inyección.

Además, durante la fase de diseño de la pieza se deben considerar factores importantes del proceso de inyección como la capacidad calorífica del material, la temperatura de inyección, la presión aplicada, la velocidad de inyección y de enfriamiento, el sistema de extracción, la precisión del molde y la dosificación del material <sup>[4]</sup>. Todas estas variables complican el diseño de las piezas.

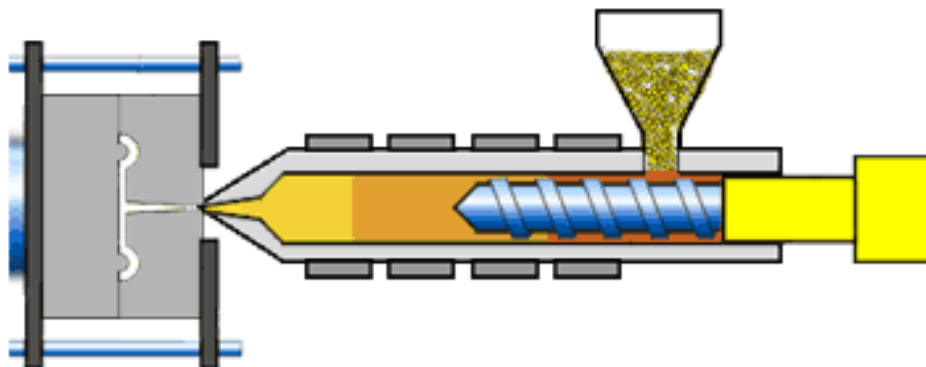


Fig. 3.2.b Esquema de inyección de plásticos.



## **Diseño y desarrollo de piezas para fabricación aditiva**

En el caso de la fabricación de una pieza por adición, el diseño es prácticamente libre, es decir, el proyectista que diseña la pieza no tiene tantas restricciones como en el caso de molde de inyección. En el diseño de piezas para fabricación aditiva no se consideran los ángulos ni la dirección de desmoldeo, tampoco se utiliza el concepto de corredera del molde. El objeto se crea capa por capa, de esta forma, no hay limitación de espacio en ningún eje de la pieza.

Según el tipo de fabricación aditiva utilizada, es posible que sea necesario el uso de soportes para obtener una pieza, pero este factor no implica modificación del diseño, simplemente un gasto adicional de material y un aumento en el tiempo de fabricación.

En el diseño de piezas para impresión 3D se debe respetar el grosor mínimo de superficie que puede ofrecer la máquina según el tipo de fabricación aditiva. También se debe tener en cuenta la temperatura y velocidad de impresión, así como la cantidad de relleno que requiere la pieza. Estos parámetros se definen en función del tipo de fabricación aditiva que se utilice, del material y de las necesidades mecánicas de las piezas.

El proceso de desarrollo de una pieza para fabricación aditiva también es diferente al convencional. Para que una pieza esté lista para ser fabricada mediante una impresora 3D, se deben seguir los siguientes pasos:

Primero, se parte de una geometría de pieza creada en un programa de diseño asistido por computadora (CAD). Seguidamente, se exporta como un archivo .STL o .OBJ legible por el software que prepara el archivo para la impresora 3D.

Una vez generado el archivo, se procesa mediante un software adicional que divide la pieza por capas. El software, de forma numérica, divide el objeto en pequeñas superficies desde la base hasta la capa superior.

Por último, el programa trata cada capa de forma individual y genera un G-code, que es el nombre que recibe el lenguaje de programación más usado en control numérico. Este código indica a la impresora como se tiene que mover para poder ir dibujando la forma de cada capa, e ir desplazándose a lo largo del eje vertical hasta construir el objeto completo. En este punto, ya se dispone del archivo que contiene las informaciones necesarias para fabricar la pieza utilizando esta tecnología.



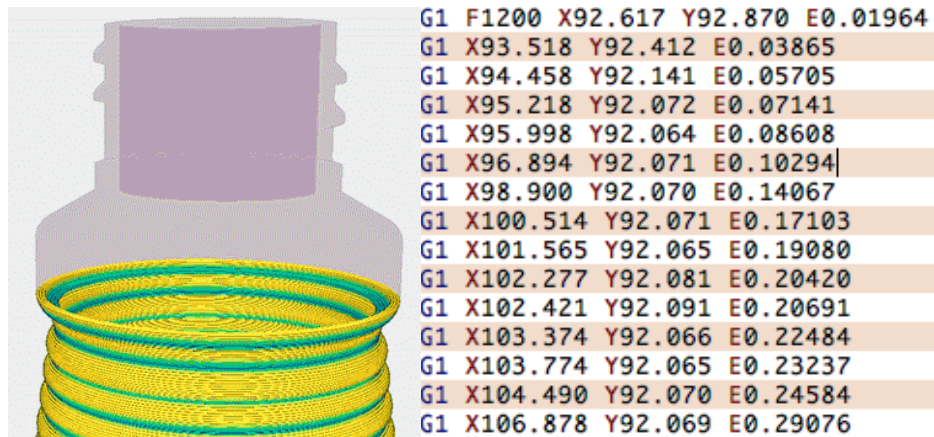


Fig. 3.2.c G-code de trayectoria de pieza por capas.

Existen tipos de tecnología de fabricación aditiva que en vez de crear cada capa siguiendo una trayectoria continua del cabezal, se hace de forma lineal, es decir, a partir de una plataforma con varios cabezales que se desplaza barriendo el área de impresión de un lado a otro. En estos casos, para preparar la pieza, no se genera un G-code sino un código propio de la tecnología de fabricación aditiva correspondiente.

### Diseño generativo de piezas para fabricación aditiva

El diseño generativo supone una mejora en el proceso de diseño de una pieza para fabricación por adición. Se trata de una optimización respecto a la geometría de la pieza. Mediante un software basado en elementos finitos (FEM) se crea una pieza que tiene la misma resistencia a esfuerzos mecánicos, pero utilizando mucho menos material.

El software únicamente genera superficies en las zonas donde calcula que la pieza va a sufrir cargas. Con esta tecnología se consigue reducir la cantidad de material utilizado y en consecuencia se disminuye el peso y el tiempo de fabricación. Esto implica una reducción de costes.



Fig. 3.2.d Piezas de diseño tradicional.



Fig. 3.2.e Pieza de diseño generativo.

### 3.3. Tipos de tecnologías de fabricación aditiva disponibles

La fabricación por adición es un método de obtención de objetos tridimensionales mediante la superposición de capas. En la actualidad existe una gran variedad de formas distintas de generar un objeto utilizando este método. Se clasifican según tipos de tecnología de fabricación por adición.

La constante evolución del sector de la impresión 3D implica que cada año aparezcan nuevas formas de fabricación y nuevos materiales. Actualmente, los tipos de tecnologías que están suficientemente desarrollados para ser utilizados en la industria del automóvil se pueden englobar en tres grupos:

- Modelado por deposición fundida (FDM)
- Estereolitografía (SLA)
- Sinterizado selectivo por láser (SLS) y Multi jet fusion (MJF)

Principalmente, se diferencian por el material utilizado y por el método de fusión de este.

#### **Modelado por deposición fundida (FDM)**

Este es el tipo de fabricación aditiva más conocido. El material utilizado y la impresora en sí se pueden obtener a un precio muy económico. El hecho de que sea tan económica, la convierte en una tecnología accesible y popular, pero esto no significa que aporte los mejores resultados. El material que se utiliza es un polímero termoplástico en forma de hilo, puede ser PLA o ABS.

El filamento de ácido poliláctico (PLA), es un termoplástico fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz. Es fácil de manipular y no emite gases nocivos durante el fundido. En cambio, el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un termoplástico que proviene de derivados del petróleo y destaca por su buena resistencia a variaciones de temperatura y su fácil postproceso.

La máquina de impresión de FDM funciona de la siguiente manera:

El material que se suministra se encuentra en forma de hilo y enrollado en una bobina, este hilo se conecta al extrusor. El extrusor aporta el material necesario al fusor, que es una cavidad que contiene una resistencia eléctrica con la finalidad de elevar la temperatura entre 200 y 230°C y se funde el hilo. Una vez fundido el hilo, el material fluye y sale a través de una boquilla, se puede modificar el diámetro de la boquilla en función de la precisión deseada.

El cabezal es el elemento que contiene el extrusor, el fusor y la boquilla, este se mueve a lo largo de un plano depositando material, en el lugar exacto que especifica en el G-code [5]. Siguiendo esta trayectoria, genera toda una capa del objeto.

Una vez finalizada la superficie, el cabezal se desplaza en el eje vertical para crear la siguiente capa del objeto. Se repite el proceso hasta completar la pieza.

En este tipo de tecnología, es necesario el uso de soportes, es decir, la máquina va construyendo una estructura a la vez que crea la pieza capa por capa. Es inevitable el uso de soporte en zonas de la pieza donde ha superficies con un cierto ángulo, en el cual, si no existe material debajo, esa zona de la capa caería y no sería factible la impresión.



Fig. 3.3.a Soporte de piezas 3D.

El modelado por deposición fundida permite generar prototipos a bajo coste, de forma sencilla y rápida (entre 2h y 10h). Pero la precisión dimensional es limitada, el acabado superficial no es completamente liso y requiere de un postproceso para retirar el soporte, en caso de ser necesario soporte. Además, las propiedades mecánicas son realmente bajas. La resistencia a esfuerzos de tracción es diferente según en el eje que reciba las cargas, es decir, tiene propiedades mecánicas anisotrópicas. En el eje vertical resiste mucho menos esfuerzo de tracción que en los ejes laterales. Este conjunto de desventajas provoca que esta tecnología no sea apta para la fabricación de piezas series para vehículos. Todo y que si es factible para la obtención de prototipos rápidos.

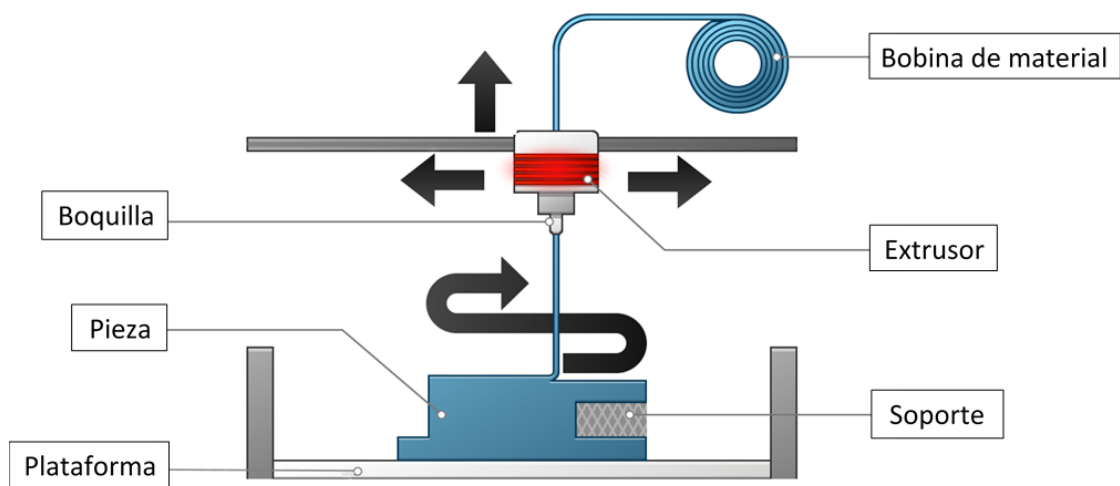


Fig. 3.3.b Esquema de máquina de modelado por deposición fundida.

## Estereolitografía (SLA)

Esta tecnología utiliza resina líquida fotosensible como material de impresión. Gracias a un proceso reactivo llamado fotopolimerización, la resina líquida, tras recibir luz UV o visible, se entrecruza formando un polímero termoestable, infusible e insoluble, de elevadas propiedades térmicas y mecánicas <sup>[6]</sup>. La estereolitografía es un método más complejo que el modelado por deposición fundida y manifiesta mejores resultados.

La máquina de impresión de SLA se beneficia de este proceso reactivo para formar cada capa del objeto tridimensional. La impresora de estereolitografía tiene un tanque que contiene resina fotosensible. En la parte superior posee un láser de luz UV o visible y, mediante el movimiento de un espejo galvánico, se dirige el láser e incide en la zona de resina líquida deseada. La luz UV o visible, sigue una trayectoria para trazar la geometría de cada sección del modelo punto por punto, solidificando la resina por zonas hasta completar la capa. Una vez finalizada la superficie, la plataforma se desplaza hacia abajo. Posteriormente, con la ayuda de un rodillo, se realiza un barrido de forma que la capa superior quede completamente cubierta de resina líquida, así queda preparada para imprimir la siguiente capa. Se repite este proceso hasta completar la pieza.

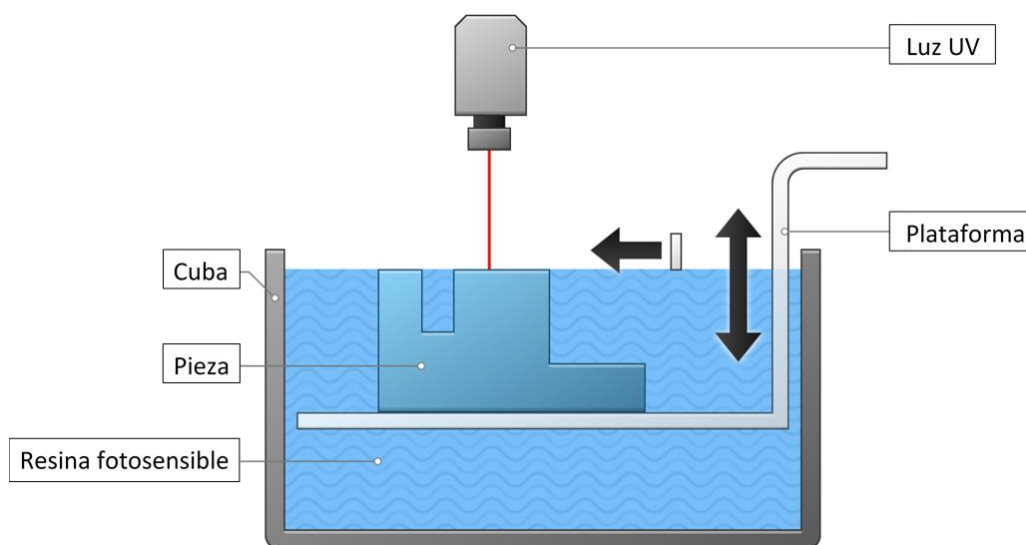


Fig. 3.3.c Esquema de máquina de estereolitografía.

Este tipo de tecnología ofrece la posibilidad de obtener piezas con un acabado de alta precisión y garantiza superficies lisas. Permite la utilización de una amplia gama de resinas, según la función que desempeñe la pieza existen resinas para piezas flexibles, rígidas o resistente a altas temperaturas. Además, las piezas pueden ser mecanizadas.

Por el contrario, este tipo de piezas se degradan si están expuestas a la luz solar y son sensibles tanto a la humedad ambiental como a la temperatura. Suele ser una tecnología cara. El coste de las resinas fotosensibles varía entre los 50 y 100 euros el litro. Además, al utilizar un material líquido, también es necesario el uso de soportes, lo que implica un gasto extra de material, tiempo de fabricación y postproceso para retirarlo.

La estereolitografía, de momento, no está suficientemente desarrollada como para fabricar piezas que puedan situarse en el interior del vehículo. Pero se está investigando en este tipo de tecnología para mejorar las propiedades mecánicas y así hacer esta tecnología viable.

### Sinterizado selectivo por láser (SLS)

El sinterizado selectivo por láser (SLS) es el tipo de tecnología de fabricación por adición que más se ha desarrollado a nivel industrial. Se utiliza un material en forma de polvo, los más comunes son PA 11 y PA 12 que corresponden a poliamidas, comúnmente llamados nylon. También se puede imprimir con PA 12 GB, una poliamida con carga de vidrio.

EL SLS se basa en un proceso de sinterizado: Al aplicar temperatura al polvo mediante un láser, este material se funde y posteriormente se solidifica.

El funcionamiento de la impresora es similar al de SLA, pero en vez de fundir resina líquida, se funde material en forma de polvo <sup>[7]</sup>. La máquina tiene un depósito de polvo situado encima de una plataforma móvil. El láser pasa sobre el material de forma selectiva sinterizando solo los granos de polvo necesarios para obtener la geometría de capa deseada. Una vez finalizada una capa, la plataforma desciende. A continuación, se realiza un barrido para tener nuevamente polvo sin fundir en la capa superior. Seguidamente se inicia la siguiente capa. Se repite el proceso hasta completar la pieza.

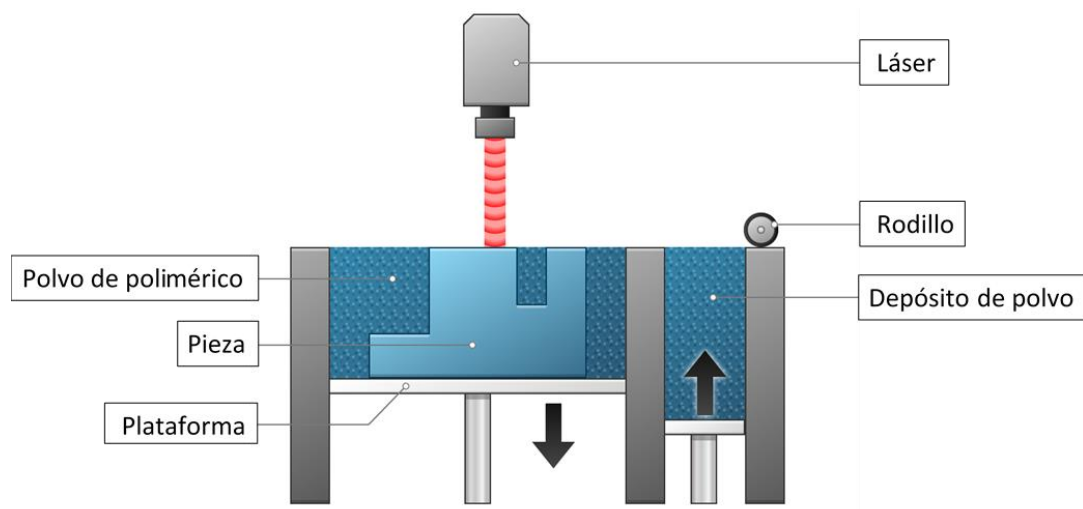


Fig. 3.3.d Esquema de máquina de sinterizado selectivo por láser.

Esta tecnología, al utilizar un polímero de ingeniería como es el caso de la poliamida, permite obtener piezas con mejor rendimiento mecánico que el resto de los tipos de fabricación aditiva. Los acabados de las piezas son lisos y de máxima precisión. Uno de los factores que diferencia el SLS del resto es que no requiere de soporte para fabricar piezas con zonas donde la superficie tiene un cierto ángulo. En este caso el propio material, al ser polvo sólido, ya actúa como soporte. Además, este tipo de tecnología posibilita el reciclaje de parte del polvo no utilizado, solo se desecha entorno al 10-20% de material en cada impresión.

Por otra parte, el ritmo de producción que pueden alcanzar las máquinas de impresión de SLS es relativamente bajo comparado con los ritmos de producción de otras tecnologías similares que ya existentes en el mercado como es el caso de la tecnología multi jet fusión (MJF).

### Multi jet fusion (MJF)

Tanto multi jet fusion (MJF) como sinterización selectiva por láser (SLS) son tecnologías de fabricación aditiva que pertenecen a la familia de fusión de lecho de polvo. En ambos procesos, las piezas se construyen capa por capa al fusionar (térmicamente o mediante sinterizado) las partículas de polvo de polímero.

La principal diferencia entre MJF y SLS es la fuente de calor usada para fundir el polvo. En SLS se utiliza un láser, mientras que en MJF la fuente de energía usada para fusionar las partículas de polvo <sup>[8]</sup> es luz infrarroja.

El proceso de fabricación de piezas utilizado MJF es el siguiente: Primero se extiende una capa delgada de polvo sobre la plataforma de construcción. En esta plataforma se calienta el material hasta alcanzar una temperatura cercana a la utilizada en el proceso de sinterización. Seguidamente, un cabezal pasa por encima de esta superficie dispensando un agente de fusión sobre el polvo, este es como una especie de tinta que promueve la absorción de luz infrarroja. Al mismo tiempo, se inyecta un agente de detalle que inhibe la sinterización cerca del borde de la pieza.

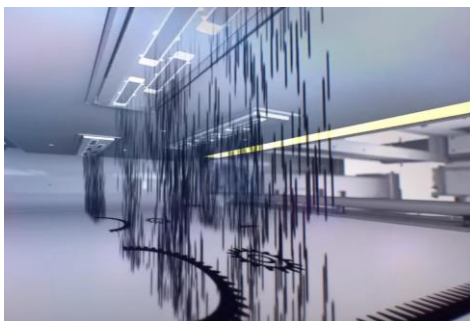


Fig. 3.3.e Aplicación de agentes de fusión y de detalle para MJF.

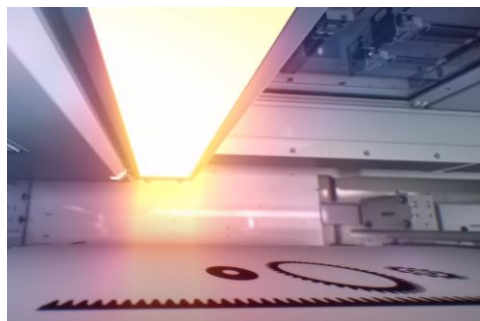


Fig. 3.3.f Aplicación de luz infrarroja para MJF.



Luego, una fuente de energía infrarroja pasa sobre la cubeta de polvo y fusiona únicamente las áreas marcadas por dicho agente de fusión. De esta forma se solidifica las zonas deseadas de la capa superior del bloque de polvo. Después, la plataforma desciende y mediante un rodillo se cubre de nuevo la capa superior con polvo sin fundir. Este proceso se repite capa por capa hasta que todas las partes estén completas.



Fig. 3.3.g Máquina de impresión y estación de procesamiento utilizados para fabricar piezas mediante la tecnología MJF.

El proceso de fusión de polvo utilizado por MJF se muestra en la siguiente ilustración:

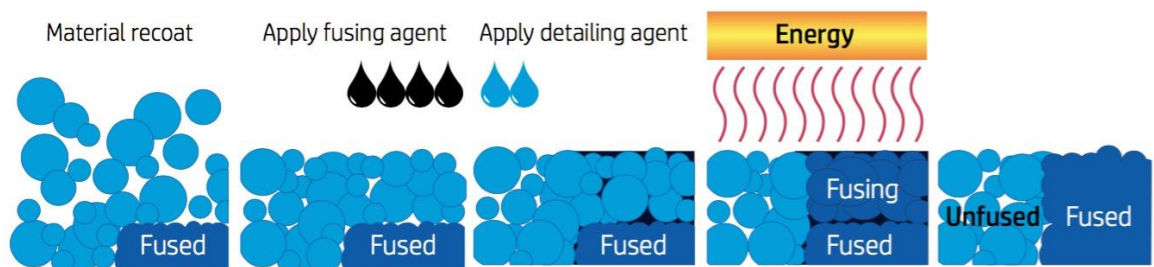


Fig. 3.3.h Ilustraciones del proceso de fusión de la tecnología MJF.

Esta tecnología es la adecuada para la fabricación de conjuntos de piezas en los que se prevé un montaje y desmontaje entre sí. Las piezas obtenidas pueden soportar temperaturas más elevadas que en el caso de la estereolitografía. MJF es actualmente el tipo de fabricación aditiva que a nivel de rendimiento mecánico y de ritmo de producción cumple los requisitos para elaborar piezas serie para vehículos. Se debe analizar si económicamente es viable.

### 3.4. Tipos de tecnologías de fabricación aditiva en desarrollo

Existe una gran diversidad de tecnologías de fabricación aditiva que se encuentran en fase de desarrollo. Todavía no están preparadas para ser utilizadas industrialmente, pero desde el punto de vista de investigación de nuevas tecnologías para un centro técnico, cabe estar informado y ver los resultados que pueden llegar a dar, con el objetivo de estar capacitados para beneficiarse de estas tecnologías cuando sean viables. Se pueden agrupar según el material que utilicen para la impresión: polímeros, metales o fibras (carbono o vidrio).

#### Desarrollo en polímeros

Siguiendo con tecnologías de impresión 3D para polímeros, existen varios métodos más de fabricación aditiva. Estos son: Material jetting y Drop on demand <sup>[9]</sup>.

- Material jetting (MJ) se basa en la inyección de material. Su principio de funcionamiento es similar al de una impresora tradicional de tinta, pero en vez de inyectar tinta, inyecta partículas diminutas de fotopolímero. De esta forma se deposita el material de construcción de una manera rápida y lineal. Una vez depositado el material, solidifica cada capa pasando una luz ultravioleta por la zona. Material jetting es una de las pocas tecnologías de impresión 3D que permite fabricar piezas de múltiples materiales poliméricos y a todo color. Por contra, es una tecnología muy cara. También requiere del uso de soporte para piezas con ciertos ángulos.
- Drop on demand (DOD) es otra tecnología de impresión 3D en desarrollo. Consiste en un tipo de fabricación aditiva que utiliza dos extrusores de material: el principal deposita el material de construcción y el secundario el material soluble para los soportes. Las máquinas DOD siguen una trayectoria determinada inyectando material en una posición puntual, creando el área transversal de un objeto capa por capa. Drop on demand tiene una aplicación muy concreta, la creación de moldes y de patrones para la fundición de cera perdida.

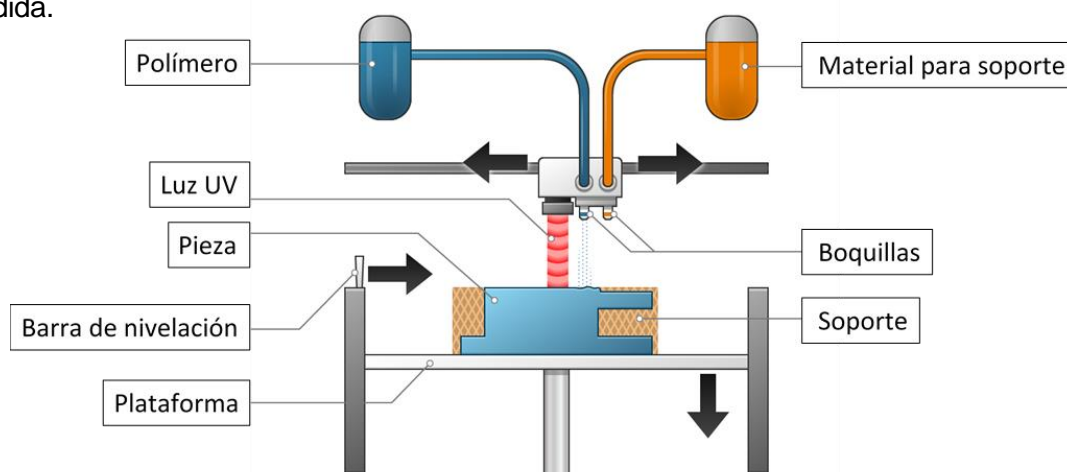


Fig. 3.4.a Esquema de máquina de Drop on demand.



## Desarrollo en metales

La impresión 3D con materiales metálicos es la tecnología más esperada para un gran número de empresas especializadas en la creación de piezas metálicas, están esperando a que evolucione lo suficiente para poder utilizarla a nivel industrial. De momento, únicamente es posible fabricar piezas metálicas con aluminio, cobre, bronce, platino y titanio. Existen varios tipos de tecnologías en desarrollo para impresión de piezas metálicas: Binder jetting, Direct metal laser sintering y Selective laser melting <sup>[10]</sup>.

Binder jetting (BJ) sigue un proceso que utiliza polvo de material metálico. Este tipo de tecnología incorpora una herramienta más avanzada respecto al resto de tecnologías de fabricación aditiva. Antes de fusionar la capa mediante el láser, se inyecta un agente líquido en la superficie que se desea solidificar. Consiste en un tipo de pegamento que une las partículas de polvo, aportando más precisión y rigidez a la pieza final. Entre las ventajas de esta tecnología se encuentra: la posibilidad de obtener piezas metálicas funcionales y a bajo coste. Por el contrario, las propiedades mecánicas respecto a la resistencia de esfuerzos son bajas.

Tanto direct metal laser sintering (DMLS) como selective laser melting (SLM) generan piezas de forma equivalente al sinterizado selectivo por láser (SLS). Se diferencian del SLS en que estos tipos de fabricación aditiva se utilizan para la producción de piezas metálicas y no son para piezas de polímero. El DMLS no funde el polvo, sino que lo calienta hasta una temperatura en la cual se puede fusionar a nivel molecular. La SLM, en cambio, utiliza un láser para hacer una fusión completa del polvo metálico hasta formar una pieza homogénea. Este proceso da como resultado una pieza con una sola temperatura de fusión. Las piezas producidas con estos tipos de impresoras 3D, a causa de las altas temperaturas, pueden deformarse debido a las tensiones residuales producidas durante la impresión <sup>[11]</sup>.

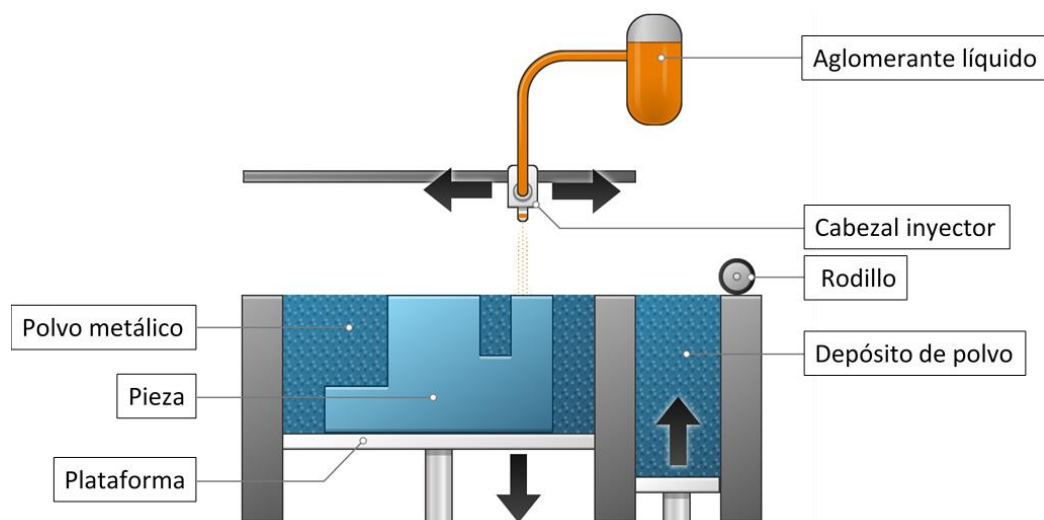


Fig. 3.4.b Esquema de máquina de Direct metal laser sintering y Selective laser melting.

### Desarrollo en fibras

Estos tipos de fabricaciones aditivas son las que se han creado más recientemente. Se trata de máquinas capaces de imprimir con filamentos que contienen fibra, ya sea fibra de carbono o fibra de vidrio, material 20 veces más rígido que el filamento ABS convencional. Realmente, son muy similares a la tecnología de impresión por hilo (FDM) pero en este caso el material combina PLA con fibras. Las fibras de carbono internas en el filamento plástico son lo suficientemente pequeñas como para no obstruir el extrusor, pero lo suficiente grandes como para aportar al plástico una resistencia adicional.

Este tipo de impresoras son capaces de fabricar mediante filamentos que contienen fibras de vidrio, filamentos de nylon, filamento de Kevlar, de HSHT (resistente a la temperatura) y filamentos de fibras de carbono.

### Desarrollo en combinación de materiales

Se está avanzando en una tecnología basada en fabricación aditiva de estructuras sobre piezas previamente fabricadas, también sirve para reparar zonas dañadas. Este proceso se llama DLMD, inyección directa de material. Consiste en fusionar un material principal, se puede inyectar un material en forma de polvo o de hilo en la zona de fusión donde está el material base.

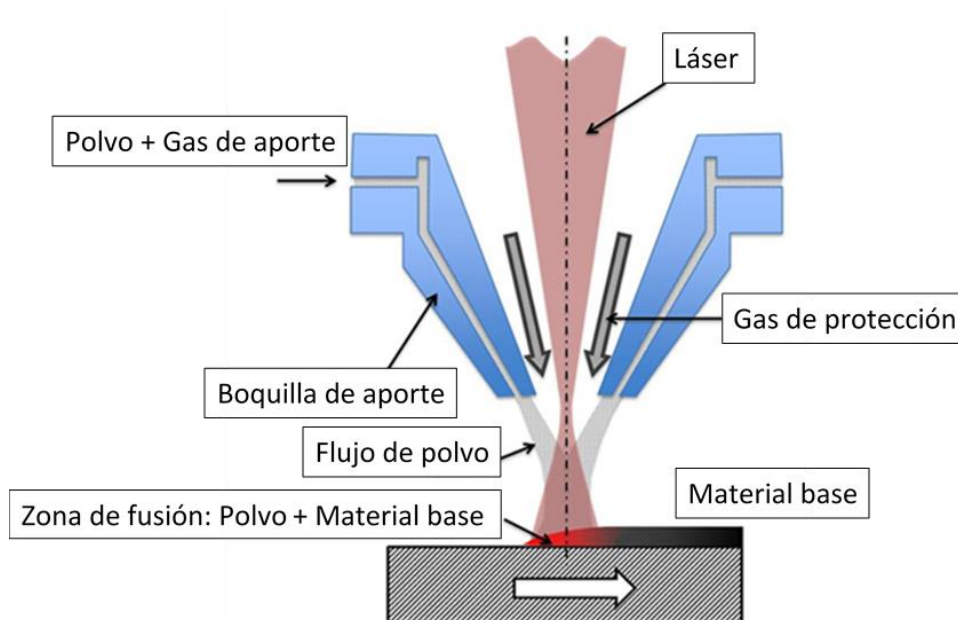


Fig. 3.4.c Esquema de máquina de inyección directa de material.

### 3.5. Materiales para la tecnología de fabricación aditiva

#### Materiales de fabricación aditiva para el sector de la automoción

Debido a la investigación y mejora de materiales plásticos, su uso en el sector automovilístico ha aumentado durante los últimos años. En muchas ocasiones se utilizan materiales plásticos para fabricar piezas que sustituyen a las que anteriormente eran metálicas. Este tipo de piezas se utilizan tanto para la zona interior como exterior del vehículo. Deben de soportar cargas, esfuerzos, vibraciones y altas temperaturas.

Se pretende conocer la amplia gama de materiales que existen para los diferentes tipos de fabricación aditiva y analizar las propiedades que ofrecen las piezas obtenidas con dichos materiales.

El objetivo es seleccionar los materiales adecuados para fabricar piezas mediante impresión 3D destinadas a vehículos de serie corta, que sustituyan a las utilizadas actualmente, fabricadas con molde de inyección. El paso previo es conocer el material que se desea sustituir. Para ello se realiza un estudio de los materiales poliméricos utilizados hoy en día. Se parte de los materiales plásticos usados en soportes de centralitas montados en vehículos de SEAT, puesto que estas son las piezas que pertenecen al departamento de desarrollo eléctrico, donde trabaja el autor del proyecto. Una vez conocidos los costes de los materiales utilizados en la actualidad, se podrán comparar con los de los materiales de impresión 3D.

La mayoría de los soportes que se desarrollan en el departamento de eléctricos de SEAT se obtienen mediante fabricación por molde de inyección. Una vez detallados los materiales utilizados en la actualidad y los empleados para la fabricación aditiva, se procede a comparar las propiedades mecánicas de ambos y sus costes.

#### 3.5.1. Materiales para tecnología de molde de inyección

Existe una gran variedad de tipos de polímeros con aplicaciones industriales, pero para el cumplimiento de los requisitos mecánicos y prestaciones que demanda el sector automovilístico solo se utilizan unos en concreto. Estos deben ser compatibles con la tecnología de molde de inyección tal y como se detalla en el apartado dedicado al diseño y desarrollo de piezas para fabricación aditiva.

Inicialmente, para acotar los materiales utilizados únicamente en el sector automovilístico, se han descartado los plásticos de producción a gran escala, como el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno (PE) o el poliestireno (PS), por las bajas prestaciones mecánicas que ofrecen.

Para piezas funcionales, como soportes de centralitas, es necesario el uso de polímeros técnicos que tengan la capacidad de absorber o transmitir una fuerza y que presenten una elevada resistencia al impacto y al desgaste. También es importante que muestren una baja dilatación térmica y que se deformen relativamente poco. Así, se obtienen piezas con geometrías estables, lo que es necesario para su correcto funcionamiento. Esta serie de características las cumplen polímeros como el polioximetileno (POM), el policarbonato (PC), algún tipo de polipropileno (PP) y la poliamida (PA).

Actualmente, en el grupo Volkswagen, las piezas fabricadas con polímeros por molde de inyección están confeccionadas principalmente por polipropilenos (PP), poliamidas (PA) y policarbonatos (PC).

Usualmente se utiliza el policarbonato (PC) para piezas vistas, localizadas en el cockpit, como por ejemplo un botón del rotativo de luces, las palas orientativas de la salida de aire del climatizador o el botón de *warning*. El policarbonato es un material termoplástico fácil de trabajar, moldear y termoconformar. Se trata de un polímero que presentan grupos funcionales unidos por grupos carbonato en una larga cadena molecular. Lo que permite obtener piezas con una elevada resistencia mecánica y resistencia al impacto, buena resistencia a la fluencia y gran estabilidad dimensional. Se suele utilizar en mecanismos de precisión y para aislamiento eléctrico.

Para aplicaciones ingenieriles donde la pieza debe resistir esfuerzos importantes, como en el caso de engranajes, rodamientos y soportes de elementos electrónicos, se emplea el polipropileno (PP) o la poliamida (PA).

Las propiedades mecánicas de los polímeros técnicos se mejoran cuando son reforzados con fibras, normalmente de vidrio, carbono o mica. La adición de estos elementos reforzantes aumenta la rigidez, la resistencia a la tracción y la estabilidad dimensional a temperaturas elevadas de las poliamidas, disminuyendo su deformación en la rotura.

La poliamida (PA) es un polímero termoplástico cuya cadena principal está formada por grupos funcionales de metileno que se encuentran unidos entre sí por medio de grupos amida. Este material muestra un carácter fuertemente polar debido a estos grupos amida, que ocasionan un alto grado de cristalinidad e intensas atracciones moleculares. Presenta una gran resistencia a la tracción y una elevada temperatura de fusión. Por esta razón la PA es el polímero termoplástico técnico más adecuado para los soportes desarrollados por el departamento de eléctricos de SEAT. En ocasiones, existen soportes que no tienen que resistir grandes esfuerzos, en estos casos, se utiliza polipropileno con cargas de fibra de vidrio. Este material no aporta propiedades mecánicas de tanta calidad como la poliamida, pero su

coste es considerablemente más bajo. Por tanto, se puede determinar que el material que se debe intentar suplir mediante fabricación aditiva es la poliamida (PA).

Dentro de la PA, se pueden diferenciar dos tipos, las que están compuestas por un único monómero de doble funcionalidad, ácido y amina, que forman la familia PA X (PA 6, PA11, PA12), donde X es el número de carbonos del monómero; y las compuestas por dos monómeros difuncionales tipos diamina y diácido que forman la familia PA X.Y (PA 4.6, PA 6.6, PA 6.10), donde X e Y son el número de carbonos de la diamina y del diácido, respectivamente.

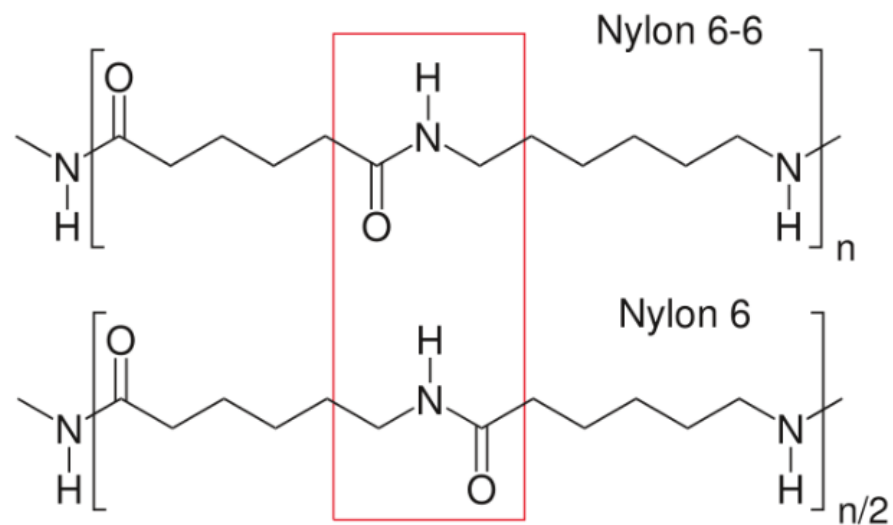


Fig. 3.5.1 Estructura molecular de los dos tipos de PA según el número de monómeros funcionales en su composición. Nylon 6-6 corresponde a la familia PA X.Y. mientras que Nylon 6 corresponde a la familia PA X.

Según el número de átomos de carbono que contiene cada tipo de PA, varían sus propiedades mecánicas. Las poliamidas que tienen un número de átomos de carbono par (PA 6, PA 6.6, PA 6.10, PA 12) cumplen que los grupos de macromoléculas contiguas están situados uno frente a otro, así, las fuerzas son máximas porque se forman importantes puentes de hidrógeno. En cambio, en las PA con número impar de átomos de carbono (PA 11) estas fuerzas intermoleculares son menores, debido a esto, el polímero es más flexible y tenaz.

Una ventaja que tienen los componentes fabricados con PA es que, debido a que internamente contiene un gran número de puentes de hidrógeno, las piezas presentan resistencia a desgaste en presencias de disolventes o de elementos reactivos agresivos.

### 3.5.2. Materiales para la fabricación aditiva

Una vez conocidas las prestaciones y propiedades mecánicas que deben poseer las piezas fabricadas por molde de inyección utilizando materiales tradicionales, se puede acotar el número de posibles materiales de fabricación aditiva que son adecuados para cumplir con este cometido.

Según el tipo de fabricación aditiva al que se opte, se utilizan materiales diferentes. Para FDM los recursos se encuentran en forma de hilo, en el caso de SLA en forma de resinas fotosensibles y para el SLS y MJF se utiliza poliamidas en forma de polvo.

En la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM) el material que se utiliza es un polímero termoplástico en forma de hilo, puede ser ácido poliláctico (PLA) o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). El filamento de PLA es un termoplástico fabricado a partir de almidón de maíz. Es fácil de manipular y no emite gases nocivos durante el fundido. En cambio, el ABS es un termoplástico formado a base de derivados del petróleo y destaca por su buena resistencia a variaciones de temperatura. Además, es un material que permite un postproceso de pieza sencillo. El coste medio de PLA se encuentra en una media de 14€/kg, en cambio, para el ABS es ligeramente superior, 17€/kg.



Fig. 3.5.2.a Bobina de PLA.

En el caso de la estereolitografía (SLA), se utilizan resinas fotosensibles a la luz ultravioleta. Estas resinas son compuestos químicos que se encuentran en formato líquido y que se solidifican al entrar en contacto con la luz UV. Una vez alcanza el estado sólido, la pieza adquiere las propiedades del material: dureza, fragilidad, opacidad; en función de los componentes químicos que lleve la resina. Existe una amplia gama de resinas, con múltiples nomenclaturas, según el fabricante. Para acotar el campo de estudio, este proyecto cuenta con las resinas de un proveedor de SEAT, en este caso, la empresa Carbon3D.

Para aplicaciones en el mundo automovilístico se diferencia entre resinas epoxy (EPX) que buscan simular el comportamiento mecánico de termoplásticos con carga, y resinas de poliuretano rígido (RPU) que intentan reproducir el comportamiento de polímeros como la poliamida o el polipropileno. En términos generales, dichas resinas tienen un coste elevado, de entre 50 y 100 €/l (con una densidad media de 1050 kg/m<sup>3</sup>, equivale a un coste de entre 47 y 95 €/kg). Pero se debe tener en cuenta que se reutiliza todo el líquido que no es empleado para la fabricación de la pieza, es decir, prácticamente la totalidad del material se convierte en pieza, sin desechos, excepto el correspondiente a los soportes de la propia pieza. El coste también varía según la cantidad de material comprado, para piezas series, la cantidad de resina demandada es elevada y, por tanto, se reduce el coste por litro.



Fig. 3.5.2.b Recipiente y muestra de epoxy líquido para SLA.

Por último, el material utilizado por las tecnologías de sinterizado selectivo por láser y multi jet fusion se encuentra en forma de polvo. Para la fabricación de piezas plásticas, los materiales más comunes son las poliamidas, concretamente la poliamida 11 (PA 11), la poliamida 12 (PA 12) y la poliamida 12 con carga (PA 12 GB). Se diferencian en algunas propiedades mecánicas. Piezas fabricadas con PA 11 se caracterizan por su alta resistencia al impacto, en cambio las de PA 12 GB destacan por su resistencia frente a altas temperaturas. El material PA 12 es la versión económica del PA 12 GB, es ligeramente menos resistente al impacto y a la temperatura. El coste de este tipo de poliamidas se encuentra en torno a 9,50 €/kg en el caso de PA 12, 12,60 €/kg en el caso de PA 12 GB y 17 €/kg para las PA 11. Estos costes se pueden llegar a conseguir si se demanda una cantidad muy elevada de este material. Si se compra pocos kilogramos de este tipo de material los precios ascienden, entre 30 y 40 €/kg.



Fig. 3.5.2.c Recipiente de PA 12 en polvo para SLS y MJF.



### 3.5.3. Comparativa entre materiales para ambas tecnologías

Con la intención de seleccionar los materiales adecuados para la fabricación de piezas serie mediante fabricación aditiva para el sector automovilístico, se procede a comparar ambas tecnologías anteriormente expuestas contrastando las propiedades mecánicas de las piezas y los costes del material.

Para ello, se ha recopilado datos de los diferentes materiales. Las propiedades mecánicas que se han utilizado para comparar dichos materiales son las siguientes:

- **Resistencia a la tracción y elongación de rotura:**

- Módulo de Young (MPa): se define como la razón de esfuerzo por unidad de deformación medido dentro de los límites de la deformación reversible. También se conoce como módulo de tracción, módulo elástico o módulo de elasticidad.
- Tensión de rotura (MPa): es el máximo esfuerzo que un material puede resistir antes de su rotura por estiramiento (la sección transversal se contrae de manera significativa). Dicho valor se obtiene realizando un ensayo de tracción.
- Alargamiento a rotura (%): corresponde al incremento de longitud que ha sufrido la probeta justo antes de romperse. Este valor se obtiene realizando un ensayo de tracción, este consiste en someter una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de esta.

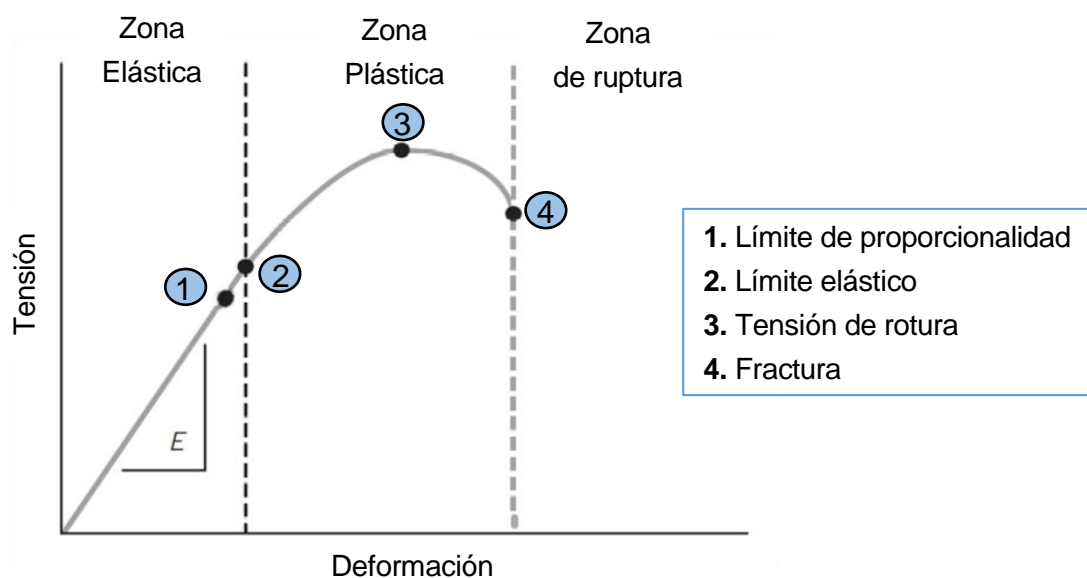


Fig. 3.5.3. Gráfico explicativo de las fases de la curva tensión-deformación.



- **Resistencia al impacto:**

- Ensayo Charpy: consiste en la ruptura de una probeta completa o entallada mediante la aplicación de un impacto con un péndulo. En este ensayo se mide la energía absorbida por el material al deformarse y romperse. Se realiza el mismo ensayo, a dos temperaturas diferentes: 23°C y -30°C:

Este ensayo permite estimar:

- La resistencia a la deformación que provoca la rotura en el material.
- La resiliencia.
- La ductilidad.
- La tenacidad.
- Qué material sirve para resistir ante cargas dinámicas.

También se ha recopilado información de características de los propios materiales:

- **Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ):** es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia o un objeto sólido.
- **HDT; Temperatura de deflexión térmica (°C) a 1,82 MPa:** es la temperatura a la que una muestra de polímero o plástico se deforma bajo una carga específica.  
La temperatura de distorsión térmica se determina siguiendo el procedimiento de prueba establecido en el test: ASTM D648. La muestra de ensayo se carga (por flexión) en tres puntos en la dirección del borde. La tensión utilizada para el ensayo puede ser de 0,455 MPa o de 1,82 MPa. En este proyecto se ha utilizado los datos aplicando 1,82MPa puesto que es la medida en el sector del automóvil. El procedimiento consiste en aumentar la temperatura 2°C/min hasta que la muestra se desvíe 0,25mm.
- **Coste medio de material (€/Kg):** Se calcula el coste medio por kilogramo de material a partir de las ofertas establecidas por varios proveedores.

## **Tablas comparativas de materiales**

A continuación, se muestran un seguido de tablas con los datos más importantes que permiten comparar la tecnología de molde de inyección con la de fabricación aditiva.

Las tablas y gráficos que contienen más información sobre dichos materiales para realizar una comparación más detallada entre ambas tecnologías se encuentran en el Anexo A.

- Materiales utilizados actualmente en la fabricación de piezas plásticas mediante molde de inyección en el sector automovilístico. Datos obtenidos a partir de las fichas técnicas de los materiales de las empresas: AKRO-Plastic, Akulon y Albis.

MATERIAL	Modulo de Young (MPa)	Tension de rotura (MPa)	Alargamiento a rotura (%)	Resistencia impacto Charpy +23°C (kJ/m²)	Res.impacto Charpy entalla +23°C (kJ/m²)	Resistencia impacto Charpy -30°C (kJ/m²)	Res.impacto Charpy entalla -30° C (kJ/m²)	HDT 1,82 MPa Temperatura de deflexión térmica (°C)	Precio medio (€/Kg)	Densidad (kg/m³)
PA 6	3.300	79	4,0	*	7,0	*	*	100	0,82	1.140
PA 6 GF10+M20	5.800	100	3,5	50	3,7	43	3,3	178	0,87	1.380
PA 6 GF15	6.100	120	3,0	52	7,0	43	6,0	205	0,90	1.230
PA 6 GF40	12.800	205	3,0	100	17,0	90	14,0	215	0,96	1.460
PA 6.6	3.600	95	3,5	*	6,0	*	6,0	85	0,90	1.140
PA 6.6 GF15	6.500	115	3,0	*	5,0	*	3,5	240	0,93	1.250
PA 6.6 GF25	8.200	145	3,2	77	13,0	73	8,0	218	0,95	1.310
PA 6.6 GF30	9.500	175	3,0	70	10,0	*	*	251	0,98	1.360
PP GF15	3.200	55	5,0	45	14,0	*	*	132	0,55	1.000
PP GF20	4.400	65	4,0	50	15,0	*	*	140	0,83	1.000
PP GF30	6.345	100	2,5	75	*	*	*	155	1,22	1.120

Tabla 1. Propiedades de materiales para piezas obtenidas por molde de inyección.

\* Corresponden a datos no disponibles.

Se clasifican dichos materiales según las ramas a las que pertenecen. Todos ellos forman parte de la gama de polímeros de ingeniería, que proporcionan propiedades mecánicas adecuadas para el sector automovilístico. Se trata de materiales de poliamida 6, poliamida 6.6 y polipropileno. Dentro de cada rama existen subdivisiones en función de la carga de fibra de vidrio que contienen. Cuanta más carga de fibra porten, mayor es su módulo de Young y mayor es su densidad.

Estos materiales aportan tensiones de rotura de entre 50 a 200 MPa de media y unos alargamientos a rotura no superiores al 5%. Alcanzan temperaturas de deflexión térmica realmente altas, comprendidas entre 100 y 251 °C.

Los costes de material no superan el euro por kilogramo en la mayoría de casos. Estos costes son realmente competitivos en el momento de fabricar largas tiradas de piezas mediante tecnología de molde de inyección.

- Materiales que pueden ser utilizados en distintos tipos de tecnología de fabricación aditiva, concretamente SLS o MJF, SLA y FDM. Datos obtenidos a partir de las fichas técnicas de los materiales de las empresas: HP, Carbon3D y Ultimaker.

MATERIAL	Modulo de Young (MPa)	Tension de rotura (MPa)	Alargamiento a rotura (%)	Res.impacto Charpy entalla +23°C (kJ/m²)	HDT 1,82 MPa Temperatura de deflexión térmica (°C)	Precio medio (€/Kg)	Densidad (kg/m³)	Nombre / Tecnologia de fabricacion aditiva
PA12 GB	2800	31,0	7,8	2,70	121	12,60	1300	Poliamida (SLS y MJF) Polvo
PA12	1800	48,0	20	3,50	106	9,50	1020	Poliamida (SLS y MJF) Polvo
PA11	1800	52,0	50	6,00	50	17,00	1040	Poliamida (SLS y MJF) Polvo
EPX 82	2800	82,0	5,9	4,40	120	>100	1155	Epoxy (SLA) Resina
EPU 40	*	7,7	250	*	*	>100	1025	Elastomeric Polyurethane (SLA) Resina
EPU 41	*	6,2	130	*	*	>100	1027	Elastomeric Polyurethane (SLA) Resina
RPU 60	1600	48,0	130	2,06	49	>100	1076	Rigid Polyurethane (SLA) Resina
RPU 61	1500	42,0	120	2,31	48	>100	1074	Rigid Polyurethane (SLA) Resina
RPU 70	1900	45,0	100	1,83	55	91,00	1076	Rigid Polyurethane (SLA) Resina
RPU 130	990	34,0	>50	10,00	54	>100	1069	Rigid Polyurethane (SLA) Resina
FPU 50	860	29,0	280	*	52	>100	1053	Flexible Polyurethane (SLA) Resina
UMA 90	731	25,0	33	*	44	>100	1200	Urethane Methacrylate (SLA) Resina
PR 25	770	29,0	22	*	45	>100	1100	Urethane Methacrylate (SLA) Resina
CE 221	3870	92,0	3,3	1,23	201	>100	1210	Cyanate Ester (SLA) Resina
PLA	1340	45,6	5,2	5,10	60	14,00	1240	Ácido poliláctico (FDM) Hilo
ABS	1681	33,9	4,8	10,50	92	17,00	1040	Acilonitrilo butadieno estireno (FDM) Hilo

Tabla 2. Propiedades de materiales para piezas obtenidas por fabricación aditiva.

\* Corresponden a datos no disponibles.

Se clasifican los materiales de fabricación aditiva según el tipo de tecnología para los que están destinados. En primer lugar, se encuentran las poliamidas en forma de polvo utilizadas tanto en SLS como en MJF. Seguidamente, están las resinas líquidas para la tecnología SLA. Por último, los materiales en forma de hilo para la tecnología FDM.

Los materiales PA 11, PA 12 y PA 12 GB son los que actualmente tienen más cabida en el sector automovilístico. Estos tienen una densidad media de 1120 kg/m³ y un módulo de Young no superior a 2800 MPa. Respecto a la tensión de rotura, alcanzan valores de hasta 52 MPa y aportan alargamientos a rotura de entre el 7 y el 50 %.

Las propiedades mecánicas son bajas en relación a las que se pueden llegar a obtener con materiales destinados a fabricación por molde de inyección. Los materiales de fabricación aditiva presentan valores de módulo de Young y de tensión de rotura notablemente inferiores respecto los materiales de inyección. Por el contrario, aportan porcentajes de alargamiento a rotura muy superiores. Lo costes son realmente elevados respecto a materiales de inyección.

### 3.6. Viabilidad económica

Para examinar la viabilidad económica de la producción de piezas mediante fabricación aditiva orientado al sector automovilístico es necesario realizar un análisis de costes. Posteriormente, se compara el coste unitario de las piezas obtenidas mediante fabricación aditiva con el de fabricación por molde de inyección, que es la tecnología más utilizada en la actualidad.

#### 3.6.1. Análisis de costes de fabricación aditiva

En el cálculo de costes de una pieza obtenida mediante impresión 3D se debe tener en cuenta todo el proceso de desarrollo de la pieza. Este proceso se inicia con el diseño, se continua con la fabricación y sigue con el postproceso, finalmente el equipo de control de calidad realiza un estudio de la pieza final.

En relación con el coste de fabricación de una pieza se distingue entre costes fijos y variables. En los costes fijos, se cuentan los costes de la electricidad consumida y del operario (la persona que tiene como función hacer el seguimiento de la impresión). En cambio, en los costes variables se incluye el valor de los consumibles: material, agentes, cabezales y filtros. También se consideran variables los costes de fabricación de piezas fallidas.

Otro factor que se debe tener en cuenta es el coste de la máquina de impresión 3D. Para realizar el análisis de costes es necesario conocer quién es el responsable de la máquina. Si la fabricación de piezas se efectúa íntegramente en la propia empresa y los operarios que la manipulan son internos, se debe añadir el coste de amortización o alquiler de la máquina. La adquisición de la impresora 3D se puede realizar de dos formas distintas: la compra directa de la máquina o a través de un modelo de renting que permite a la empresa disponer temporalmente de la máquina. Otra opción es la contratación de una empresa que actúa como proveedora, que se hace responsable de la máquina y de los empresarios.

#### Cálculo del coste unitario mediante fabricación aditiva

Puesto que es una tecnología en desarrollo y relativamente nueva, no se ha establecido todavía unos criterios concretos para el cálculo de coste unitario de piezas fabricadas por impresión 3D. Existe una gran variabilidad de costes de máquinas y material en función del tipo de tecnología de fabricación aditiva que se utiliza. En este proyecto se ha analizado los distintos factores que se debe tener en cuenta para realizar un análisis económico para fabricación aditiva y se han integrado en una única ecuación.

Se estima que el coste unitario de un tipo de pieza determinado fabricado por tecnología de fabricación aditiva viene dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Coste u pieza} = \text{Coste material/u} + \text{Coste electricidad/u} + \text{Coste postproceso/u} + \text{Coste fallo/u} + \text{Coste operario/u} + \text{Coste amortización o alquiler/u}$$

(Ec. 3.6.1)

- El coste de material por unidad se calcula a partir del peso de una pieza y el coste por kilogramo del tipo de material seleccionado y del material desechado correspondiente a cada pieza (normalmente es un 20% de material por ciclo):

$$\text{Coste material/u} = \left( \text{Peso por pieza(Kg)} + \frac{\text{Material desechado por ciclo(Kg)}}{\text{Nºpiezas tipo por ciclo}} \right) \cdot \text{Coste material(€/Kg)}$$

(Ec. 3.6.2)

- El coste del consumo de electricidad se calcula teniendo en cuenta el tiempo que se tarda en realizar un ciclo, es decir, una impresión completa. También es necesario contemplar el precio medio de la electricidad en España y el número de piezas por ciclo. Contando que el precio medio del kWh en España es de 0.129 €/kWh y que una impresora de fabricación aditiva industrial consume en una hora 10,5 kW de media, el coste por hora de trabajo es de 1,35€/h.

$$\text{Coste electricidad/u} = \frac{\text{Tiempo por ciclo(h)} \cdot \text{Consumo impresora 3D(kW)} \cdot \text{Precio electricidad(€/kWh)}}{\text{Nºpiezas tipo por ciclo}}$$

(Ec. 3.6.3)

- El coste de postproceso depende del tipo de fabricación aditiva que se utilice. En el caso de FDM y SLA el postproceso consiste en retirar el soporte. En el caso de SLS y MJF consiste en separar la pieza del polvo realizando una limpieza con aire a alta presión. También se puede incluir, para cualquier tipo de tecnología, un tintado, un pulido químico o un pulido por vibrado con abrasivo. Se deduce que el coste por unidad depende del tipo de postproceso.

$$\text{Coste post proceso/u [según tipo de post proceso]} = \text{Proceso de limpieza} + \text{Tintado} + \text{Pulido químico/vibrado}$$

(Ec. 3.6.4)

- El coste por fallo equivale al coste de la cantidad de material perdido en impresiones de piezas erróneas o impresiones de prueba de las primeras piezas. Se utiliza un porcentaje que define qué cantidad de piezas de la tirada salen defectuosas (normalmente es un 2%):

$$\text{Coste fallo/u} = \text{Piezas fallidas(\%)} \cdot \left( \text{Peso por pieza(Kg)} + \frac{\text{Material desechado por ciclo(Kg)}}{\text{Nºpiezas tipo por ciclo}} \right) \cdot \text{Coste material(€/Kg)}$$

(Ec. 3.6.5)

- El coste de operario corresponde al coste por hora del técnico de la impresora. También depende del tiempo que invierta en la preparación de la máquina y la postproducción.

$$\text{Coste operario/u} = \frac{\text{Tiempo preparación máquina(h)} \cdot \text{Salario del operario(€/h)}}{\text{Nº piezas tipo por ciclo}} \quad (\text{Ec. 3.6.6})$$

- El coste de amortización es el importe adicional añadido a cada pieza que corresponde a la inversión que realiza la empresa por la maquinaria. Este coste, únicamente se plantea cuando la fabricación de la pieza se realiza directamente en la empresa. El coste de la impresora por mes se puede obtener tanto del coste del alquiler (renting) como del coste de adquisición de la máquina. Se debe tener en cuenta el número de piezas que se fabrican por ciclo de impresión, el número de ciclos que se puede realizar por día y los días que puede trabajar la máquina en un mes.

$$\text{Coste amortización o alquiler/u} = \frac{\text{Coste renting de impresora/mes(€/mes)}}{\text{Nº piezas/ciclo} \cdot \text{Nº ciclos/día} \cdot \text{Nº días trabajo máquina/mes}} \quad (\text{Ec. 3.6.7})$$

### Criterios de rentabilidad

Los criterios de rentabilidad establecidos para analizar el coste unitario de la fabricación aditiva son: el volumen de tirada y el tamaño de la pieza que se desea fabricar.

- El volumen de tirada indica la cantidad de unidades que la empresa necesita obtener de un tipo de pieza en concreto. Una característica de la fabricación aditiva es que el coste por unidad no varía en función del número de piezas que se fabrique. En la impresión 3D no se requiere ningún tipo de utillaje ni molde para fabricar la pieza. Por tanto, los únicos factores que influyen en el coste por unidad son la cantidad de material utilizado, el coste de electricidad, el postproceso, el coste de fallo, el coste del operario y el coste de amortización. Una vez definida la geometría de la pieza estos costes quedan fijados, no dependen del volumen de tirada.



Fig. 3.6.1.a Coste unitario respecto volumen de tirada de fabricación aditiva.

- El tamaño de pieza influye significativamente en el coste unitario por dos factores: la cantidad de material utilizado y la cantidad de piezas que se pueden fabricar por ciclo según el volumen del área de impresión permitido por la impresora 3D.

La cantidad de material necesaria para la fabricación de cada unidad es un factor relevante para el cálculo del coste por pieza puesto que en este tipo de tecnologías el material utilizado tiene un precio elevado. Cuanto más volumen tenga la pieza, más material se utilizará y más alto será su coste.

El segundo factor de dependencia con el tamaño de la pieza es la capacidad volumétrica de fabricación de la impresora 3D. El volumen de impresión se limita al tamaño de la cubeta de la máquina. Por lo general, no suele superar los 45l de capacidad. El coste de la pieza varía según la cantidad de piezas que se puedan imprimir en un ciclo. Cuanto más grande es la pieza, más ciclos de impresión serán necesarios para llegar al volumen de tirada fijado. Es decir, más ciclos equivale a más tiempo de fabricación, lo que implica un aumento en costes de electricidad, de horas trabajadas del operario y de tiempo que se debe disponer de la máquina.

El siguiente grafico muestra la variación del coste unitario de piezas obtenidas por fabricación aditiva en función del tamaño de la pieza. En este grafico se considera que la máquina de fabricación aditiva esta amortizada. Se hace esta consideración para poder comparar dicha tecnología con la de molde de inyección, en la cual no se tiene en cuenta el coste de la máquina de inyección para realizar el cálculo unitario (en cambio, el molde si se tiene en cuenta).

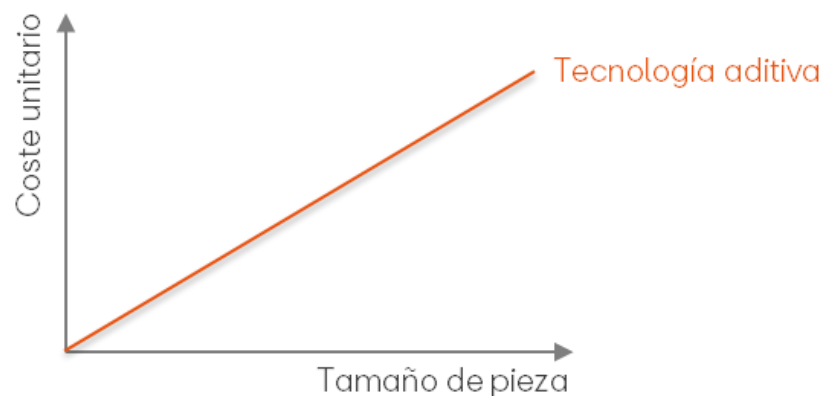


Fig. 3.6.1.b Coste unitario respecto al tamaño de pieza de fabricación aditiva.

### 3.6.2. Comparativa con molde de inyección

La implantación de la fabricación aditiva en la industria será efectiva en el momento en que el uso de esta tecnología sea más rentable que la fabricación por molde de inyección, contando con que las piezas obtenidas mediante esta tecnología cumplan con los requisitos técnicos especificados por el consorcio. Por esta razón se ha comparado los criterios de rentabilidad anteriormente especificados para la fabricación aditiva frente a la fabricación por molde de inyección.

Para poder comparar ambas tecnologías antes se debe saber calcular el coste unitario de las piezas obtenidas por fabricación por molde de inyección. Este coste se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Coste u pieza} &= \text{Coste molde/u} + \text{Coste tooling/u} + \text{Coste fabricación/u} = \\ &= \frac{\text{Coste molde}}{u \text{ fabricadas}} + \mathbb{Z} \left[ \frac{u \text{ fabricadas}}{\text{volumen lote}} \right] \cdot \frac{\text{Coste run of tool}}{u \text{ fabricadas}} + \text{Coste fabricación/u} \end{aligned}$$

(Ec. 3.6.8)

El coste de *run of tool* corresponde al tiempo de preparación de utillajes. El proveedor dispone de varias máquinas de inyección y una gran cantidad de moldes que van rotando por estas máquinas. Cada vez que el proveedor coloca el molde en la máquina de inyección implica un coste por tiempo y operario que repercute en el coste unitario final de la pieza. En el coste de fabricación se incluye el coste por material, operario, electricidad que consume la máquina y postproceso.

La manufactura industrial se guía por la necesidad de buscar economías de escala: producir una unidad más es más barato que la media de las unidades producidas anteriormente. Esto es debido a la dilución de los costes fijos que comporta. En la tecnología de inyección se utiliza un molde diferente para fabricar cada tipo de pieza, lo que implica que una parte importante del coste por pieza corresponde al coste del molde. Por tanto, cuantas más piezas de un mismo tipo se fabriquen, menor será el coste de amortización del molde correspondiente a cada pieza. En el caso de la fabricación aditiva, no es así, el coste marginal de fabricar una unidad más únicamente corresponde al coste de la materia prima. Todas las unidades tienen exactamente el mismo coste. De esta forma, las economías de escala no tienen sentido para la impresión 3D.



Para volúmenes de tiradas bajos, es más rentable económicamente la fabricación aditiva. A partir de un número de piezas determinado, la fabricación convencional pasa a ser la más beneficiosa.

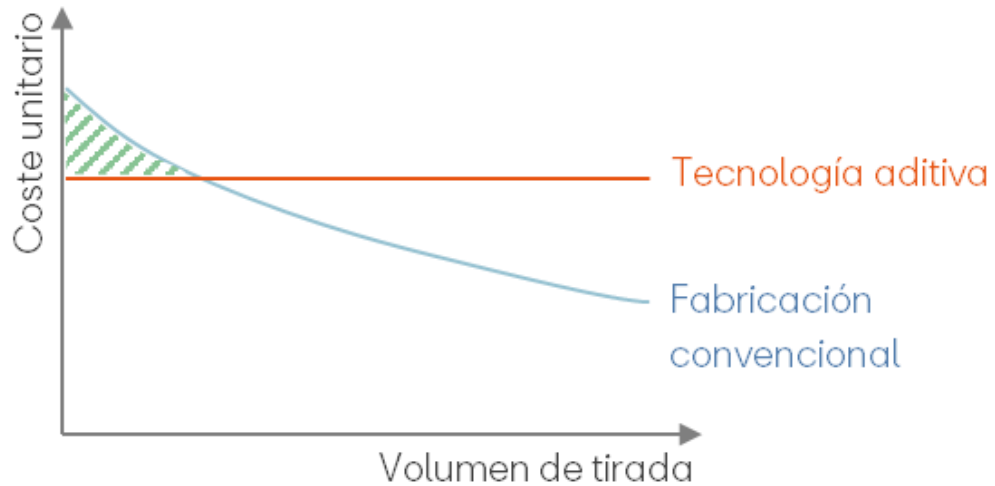


Fig. 3.6.2.a Comparativa de costes unitarios respecto al volumen de tirada entre fabricación aditiva y fabricación convencional.

El coste del material de fabricación es una variable con gran impacto en el cálculo del valor unitario de las piezas. A medida que se siga investigando para conseguir una reducción del precio de los materiales, el coste por pieza bajará y la cantidad de piezas para la cual sea rentable producir con fabricación aditiva será más grande.

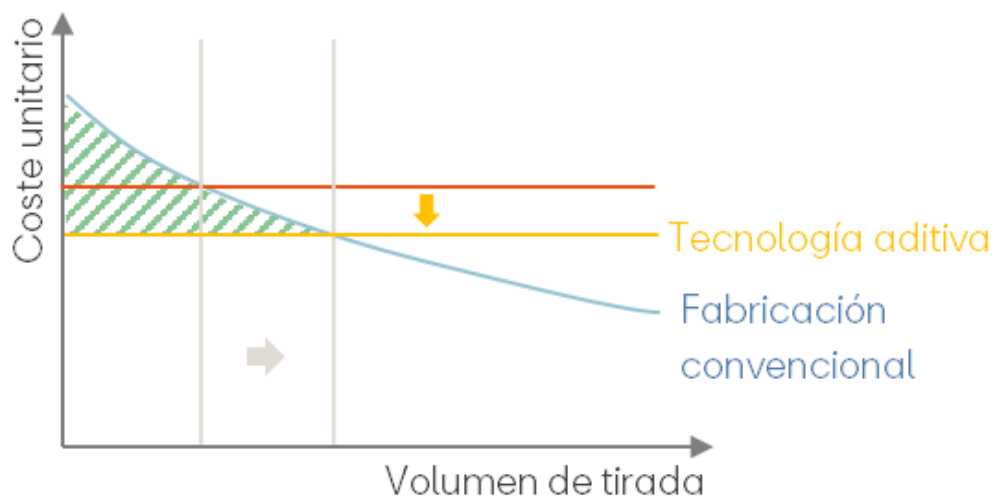


Fig. 3.6.2.b Comparativa de costes unitarios con reducción de coste del material.

En el sector de fabricación por molde de inyección, el tamaño de las piezas no afecta significativamente en el coste unitario de la pieza obtenida. Únicamente se observa un coste ligeramente superior en el caso de fabricación de piezas pequeñas y de piezas muy grandes.

En cambio, el comportamiento de la tecnología de fabricación aditiva en relación con el tamaño de pieza es diferente. En cada ciclo de impresión se pueden fabricar varias piezas a la vez, cuantas más piezas se obtienen por ciclo, más se reduce el coste unitario de dicha pieza. En base a este comportamiento, cuanto más grande sea la pieza, más volumen ocupa, por tanto, menos piezas se pueden fabricar por ciclo, encareciendo así el coste por unidad.

Se concluye que la fabricación por adición es rentable únicamente con piezas de volúmenes pequeños. En el momento en que supera unas determinadas dimensiones de geometría de pieza, es recomendable utilizar la fabricación convencional por molde de inyección.

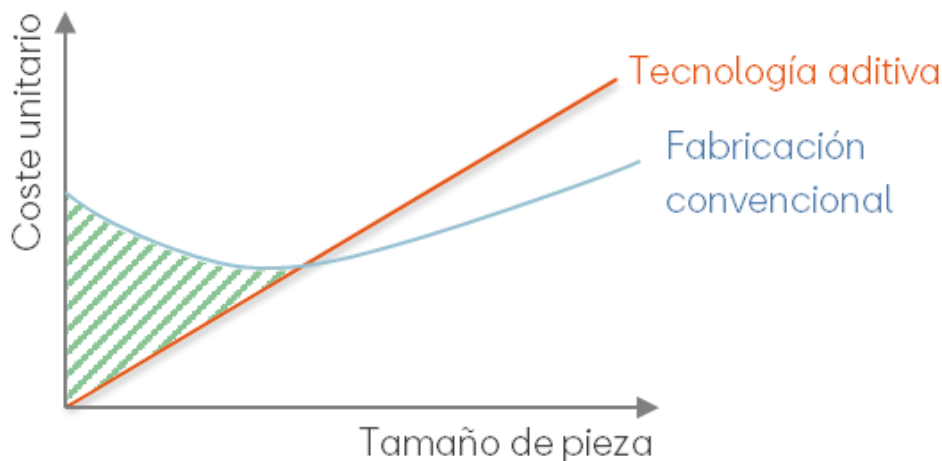


Fig. 3.6.2.c Comparativa de coste unitario respecto al tamaño de pieza entre fabricación aditiva y fabricación convencional.

Un factor económico importante y no relacionado con el coste unitario de las piezas es la logística de la tecnología de fabricación aditiva. En el caso de la tecnología de molde de inyección, el molde se ubica en la fábrica del proveedor, lo que implica la necesidad de disponer de un almacén para guardar el stock de las piezas generadas y una red de distribución para transportar dicha pieza desde el lugar de fabricación hasta el lugar de ensamblaje. En el caso de la impresión 3D, el hecho de disponer de una máquina de estas características directamente en el lugar de montaje de la pieza fabricándolas *just in time* supone un ahorro directo en almacenamiento y transporte.

Otro factor influyente es el peso de las piezas. En el sector automovilístico el peso del vehículo es crucial, cuanto menos pese, menos consumirá el vehículo. Pero en la actualidad, es aún más importante la reducción de peso. La unión europea ha tomado una serie de medidas respecto al consumo de los vehículos para disminuir la contaminación. Estas medidas implican que los nuevos vehículos que se fabriquen deben emitir mucho menos CO<sub>2</sub> que los coches fabricados hasta el momento. En el caso de no cumplir con estas restricciones, se impondrían unas multas muy elevadas a la empresa afectada. La situación actual evoca a intentar reducir al máximo el peso de cada componente que lleva el vehículo.

Una pieza obtenida por fabricación aditiva puede ser hasta un 40% más ligera que una pieza obtenida por métodos convencionales. Además, en algunos casos es económicamente favorable fabricar piezas por impresión 3D, aunque sean más caras que por fabricación convencional, porque pesan menos. La empresa se evitaría el pago de multas por emisión de CO<sub>2</sub> que implicarían un coste más elevado que no la diferencia entre la forma de obtención de las piezas.

## 4. Implantación de fabricación aditiva en SEAT

### 4.1. Ventajas y limitaciones

La fabricación aditiva puede aportar grandes ventajas respecto a los métodos de fabricación de piezas de plástico actuales.

A nivel económico, dentro de la industria automovilística, permite obtener piezas en plazos de fabricación más cortos que los habituales y utilizando materiales menos densos, lo que implica un ahorro de peso de la pieza. Como se ha comentado anteriormente, este factor es clave en el mundo del automóvil puesto que supone un ahorro de peso en el vehículo; que implica un ahorro del consumo.

Respecto al desarrollo de piezas, el diseño para piezas de fabricación aditiva es libre permitiendo obtener piezas con geometrías complejas. Al crear la pieza capa por capa, no es necesario el uso de moldes, lo que implica un ahorro muy importante del precio de la pieza en el caso de piezas de serie corta, es decir, que se producen lotes pequeños, pocas unidades. Además, al no utilizar utillajes, aporta flexibilidad respecto a los cambios de diseño; permite realizar un proceso de prueba y error durante el desarrollo de la pieza mediante prototipos. Se puede verificar directamente en el vehículo con una pieza física si se cumplen los requisitos dimensionales necesarios; y en el caso de haber un error, solucionarlo antes de la siguiente prueba.

En relación con la logística, se evita el coste que supone el transporte de las piezas desde el punto de fabricación hasta la fábrica de ensamblaje. No se depende de un molde que solo puede estar físicamente en un lugar. Si una misma pieza debe ser montada en diferentes vehículos que se ensamblan en diferentes fábricas, esta misma pieza se puede fabricar directamente en cada punto de ensamblaje si se dispone de una impresora 3D en el lugar.

También supone que las piezas de recambio nunca quedan obsoletas. Si es necesario una pieza de un vehículo para sustituirla por una pieza rota, se imprime directamente la pieza deseada, porque la geometría y el G-code están contenidos en un archivo. De esta forma se evita el coste de mantenimiento del molde. Este concepto es conocido como almacén virtual.

Ventajas como la reducción del transporte de las piezas o la reducción de peso, es decir, reducción de consumo, suponen beneficios a nivel medioambiental. En el parlamento europeo se están aprobando fuertes medidas para la reducción de CO<sub>2</sub> de los vehículos, directamente

relacionado con el consumo de este. Actualmente, en las empresas automovilísticas, la reducción de peso supone un factor muy importante para estar por debajo de los límites de consumo establecidos.

La flexibilidad de diseños que permite la tecnología da la posibilidad de customizar partes de las piezas a gusto del cliente. Mejorando así la experiencia del cliente en el momento de adquirir el producto.

La fabricación aditiva tiene grandes ventajas, pero también está sujeto a limitaciones. Esta tecnología se encuentra en plena fase de desarrollo, lo que implica que todavía hay margen de mejora en muchos aspectos.

El precio del material actualmente es elevado. El tamaño de las piezas que se puede obtener está limitado al volumen de las cubetas de las impresoras 3D. Las propiedades mecánicas son relativamente bajas en comparación con las piezas fabricadas mediante molde de inyección. Para obtener piezas directamente en la fábrica de ensamblaje y ahorrar así el transporte, es necesario la inversión en maquinaria de fabricación aditiva que tiene un coste elevado. Por lo tanto, en vistas del nivel de desarrollo actual de la fabricación aditiva es necesario realizar cálculos para comprobar la viabilidad económica de la tecnología. Se prevé que es rentable únicamente para volúmenes de tirada de piezas reducido.

## **4.2. Oportunidades actuales y de futuro en SEAT**

La fabricación por adición es una tecnología en desarrollo, pero ya existen las primeras máquinas de impresión 3D con resultados aceptables para prototipos a nivel industrial.

Actualmente en Centro Técnico de SEAT ya se dispone de una impresora de HP de tecnología MJF para la impresión de prototipos. En esta empresa ya se estudia la utilización de esta tecnología para que el cliente pueda personalizar alguna pieza, como la carcasa de la llave del vehículo o la bandeja interior, más adelante se exponen estos ejemplos.

Además, en fábrica, llevan varios años utilizando la tecnología de fabricación aditiva para obtener herramientas específicas para montar piezas en lugares de espacio reducido o con características especiales.

Se cuenta con el soporte de proveedores del entorno de SEAT que trabajan en el desarrollo de fabricación aditiva: HP, Stratasys, Leitat y Carbon3D.

En un futuro inmediato se podrá ver más avances, como la posibilidad es sustituir algunas piezas fabricadas con moldes de silicona/aluminio por piezas obtenidas por fabricación aditiva. Deben ser piezas de serie corta y para zonas con bajos requerimientos mecánicos.

La industria de la fabricación aditiva está evolucionando y próximamente será posible obtener piezas metálicas (de momento aluminio y titanio) o incluso de fibra de carbono.

Por último, respecto al futuro a medio o largo plazo se prevé una rebaja en el precio de los materiales. Esto dará pie a la posibilidad de fabricar piezas en serie de tiradas medias y provocará ahorros logísticos mediante el uso del concepto de almacén virtual.

### **4.3. Preselección de la tecnología de fabricación aditiva**

Una vez conocidas las tecnologías disponibles en el mercado y más concretamente, las accesibles para SEAT, se realiza una preselección de los tipos de tecnologías de fabricación aditiva con las cuales se van a fabricar unos prototipos de piezas. Estos prototipos se someterán a los ensayos de vibración y fatiga habituales en piezas del consorcio para ser homologadas. Además, para la selección final también se analizará la viabilidad económica.

Las dos tecnologías preseleccionadas para iniciar esta serie de pruebas son MJF (con la empresa HP) y SLA (con la empresa Carbon3D). Se ha escogido estos tipos de fabricación aditiva porque tienen la capacidad de producir piezas con propiedades mecánicas cercanas a las obtenidas en piezas de molde de inyección. A priori, la producción de piezas con estas tecnologías puede ser rentables a nivel económico para series cortas. Para comprobarlo, se realizará un estudio mecánico y económico completo con dos piezas reales con la intención de sustituir las piezas de molde de inyección ya existentes en SEAT.

### **4.4. Requisitos que debe cumplir una pieza: BMG**

Antes de introducir una pieza serie en los vehículos, se debe realizar un conjunto de pruebas para verificar que dicha pieza resiste los esfuerzos mecánicos a los cuales estará expuesta a lo largo de su vida útil. En el grupo VW y, por tanto, en SEAT, estas pruebas se recogen en un documento llamado Baumustergenehmigung (BMG). Este documento certifica que una pieza ha superado con éxito las pruebas de funcionalidad, montaje y exigencias constructivas a nivel de requerimientos de I+D.

Se realizan mediciones, un estudio del material, reuniones con el fabricante, comprobación del estado de máquinas, control de procesos y visita al lugar de fabricación para dar validez a la obtención del BMG para una pieza.

La responsabilidad de que las piezas superen las pruebas de verificación recae en el desarrollador de la pieza. Es la persona que está en contacto con el proveedor que fabrica la pieza, y es quien debe exigir que se confeccione dicha pieza tal y como se ha proyectado.

Según los requerimientos que se deben cumplir, se programan unos u otros ensayos. Se pueden realizar ensayos de vibración, de niebla salina o de informe de montaje por experimentación, entre otros.

Después de comprobar si la pieza pasa los ensayos, para completar la aprobación Baumuster, el desarrollador adjunta dos informes técnicos, el primero relacionado con los materiales que componen la pieza, y el segundo se trata de un informe dimensional, en el que se revisa si las cotas se cumplen. En el caso de los soportes de centralitas desarrollados en el departamento de eléctricos del Centro Técnico de SEAT, debido a la funcionalidad que tienen, deben superar ensayos de vibraciones de sus piezas.

## 4.5. Metodología de ensayos de vibración

El ensayo de vibración consiste en someter una pieza a un movimiento oscilatorio durante un tiempo determinado y aplicado secuencialmente en direcciones diferentes.

Para este proyecto, dichos ensayos se realizan en el laboratorio de vibraciones de SEAT. Inicialmente, se debe reconstruir la zona del vehículo en la que va ubicada la pieza de la forma más realista posible. También deben reproducirse la posición de montaje y la rigidez de conexión, incluyendo los conductores, mazos de cable, etc. Si un determinado componente no va montado directamente sobre la estructura del vehículo, sino por medio de un soporte adicional, debe construirse el dispositivo de ensayo con dicho soporte.

Una vez se cuenta con el utillaje de simulación, se monta en la mesa oscilante (Shaker). Una vez instalado el utillaje, se hace un informe previo de la situación de montaje que consisten en hacer fotografías para documentar todos los pasos que se siguen en cada ensayo. Se toman imágenes del utillaje, del soporte y de la centralita que sujeta.

Las condiciones del laboratorio necesarias para realizar el ensayo de forma correcta son:

- Temperatura ambiente:  $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- Humedad relativa del aire: 45% a 75%.
- Garantizar que las probetas se encuentren a temperatura estable.

A lo largo del ensayo se aplican secuencialmente sobre la probeta las sollicitaciones desde las 3 direcciones del espacio. Primero, debe someterse a ensayo la dirección vertical (Z), después la dirección transversal (Y) y por último la dirección longitudinal (X).

Dado que durante la vida útil del componente tendrá que trabajar a distintas temperaturas, es preciso superponer un ciclo de cambio de temperatura durante una sollicitación. Este ensayo con variación de temperatura se realiza durante el ciclo de vibración del eje Z. Este ensayo es el único que se ejecuta dentro de una cámara climática, que varía la temperatura desde -40°C a 75°C.

Las sollicitaciones mecánicas que actúan sobre la probeta vienen especificadas por una función aceleración – tiempo de 12h de duración para cada dirección espacial. En cada ensayo, se genera una serie de oscilaciones, de forma aleatoria, contenidas en un rango de frecuencias que va de 5 a 200Hz.

El ensayo se realiza con tres piezas. Todas las probetas se someten a ensayo en las tres direcciones espaciales. Si las tres piezas resisten al ensayo completo sin daños y manteniendo un par de apriete (no inferior al 30% respecto del inicial) se considera que la pieza ha pasado la prueba. Por lo tanto, se redacta un documento certificando que dicha pieza ha pasado el ensayo de vibración y se le otorga la aprobación de Baumustergenehmigung.



Fig. 4.5 Maquinara para realizar ensayo de vibración con cámara climática.



## 5. Estudio de viabilidad de piezas en SEAT

Una vez analizadas las tecnologías de fabricación aditiva disponibles con los materiales correspondientes y preseleccionadas las más viables tanto por coste como por propiedades mecánicas resultantes, se aplican estos conocimientos para ensayar con piezas reales de vehículos obtenidas con dichas tecnologías.

Este proyecto se centra en analizar la viabilidad de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva para ser introducidas en vehículos de serie corta. Para ello, se estudian en profundidad dos piezas que corresponden al departamento de desarrollo eléctrico en el centro técnico de SEAT. Estas piezas son: soporte VIP Pedal y soporte E-noise. Ambas actúan como soportes de centralitas que gestiona el departamento. Son piezas que ya existen, actualmente se fabrican por molde de inyección. El objetivo es comparar entre fabricación aditiva y fabricación por molde de inyección el coste por unidad y las propiedades mecánicas para comprobar si es viable la introducción de este tipo de tecnología en la industria.

Se han seleccionado estas dos piezas porque tienen tamaños notablemente diferentes. Como se ha comprobado en el apartado de estudio económico, el tamaño es un factor clave para deducir el coste unitario. De esta forma, con dos aplicaciones reales se podrá constatar esta dependencia.

Antes de presentar el proceso relacionado con las piezas seleccionadas para hacer los ensayos, se explican varios proyectos ya existentes en SEAT que utilizan fabricación aditiva. En estos casos, se usa esta tecnología para customizar piezas a gusto del cliente. Se trata de la carcasa de la llave del vehículo y de la bandeja de la consola. Son piezas que se encuentran en lugares visibles del vehículo y tienen requisitos mecánicos bien distintos.

Estas piezas son un claro ejemplo de la posibilidad de customizar las piezas a gusto del cliente sin necesidad de encarecer el coste de forma desorbitada. Sería imposible customizar piezas por la tecnología de molde de inyección, no es viable realizar un molde por cada variación de pieza que se desee fabricar.

## 5.1. Customización de piezas en SEAT

### 5.1.1. Personalización de la llave del vehículo

Antes de invertir recursos en el desarrollo de piezas fabricadas con tecnología con requisitos mecánicos, la empresa utilizó esta tecnología para piezas más sencillas.

En 2019 se inició un proyecto de innovación en el cual se estudiaba la posibilidad de dar al cliente la opción de customizar la llave de su vehículo ya sea con relieves distintos o introduciendo texto. Para dar cabida a esta idea, se seleccionó la fabricación aditiva como tecnología a utilizar para ofrecer esta función al cliente. Este proyecto sigue adelante en la actualidad y con resultados favorables. Se trata de obtener mediante impresión 3D la carcasa superior e inferior de la llave con la personalización propuesta. Debido a la exclusividad que aporta la customización de la llave, únicamente se ofrecerá esta posibilidad a clientes que adquieran un vehículo de la gama deportiva CUPRA.

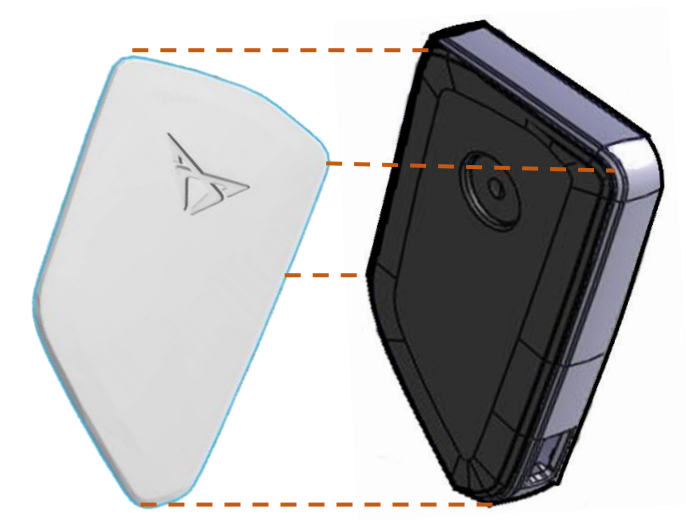


Fig. 5.1.1 Simulación de carcasa de llave CUPRA.

La carcasa de la llave del vehículo es una pieza exterior vista. El material de fabricación de la carcasa tradicional es PA 6 GF y se obtiene mediante molde de inyección. Para la obtención de la carcasa personalizada, existen dos posibilidades, la utilización de fabricación aditiva MJF o SLA. Para la validación de esta pieza se debe asegurarse su correcto clipado/desclipado, estanqueidad, resistencia a la intemperie y a rayos UV.

Al ser una pieza vista, podría ser necesario someter las piezas a postprocesos mecánicos, químicos y/o imprimación de pintura para satisfacer los estándares de calidad de SEAT.

### 5.1.2. Personalización de la bandeja de la consola

Debido a los buenos resultados en la personalización de la carcasa de las llaves del vehículo, se decidió seguir invirtiendo en el desarrollo de piezas personalizables mediante tecnología de fabricación aditiva. Esta vez, con un reto mayor, en el interior del coche. Se trata de que el cliente pueda personalizar a su gusto la bandeja para la consola central seleccionando texturas, tramas, grabadas e incluso texto. La bandeja de la consola es una pieza vista y flexible, lo que aumenta la complejidad de la pieza.



Fig. 5.1.2 Simulación de bandeja customizada en el interior de un vehículo SEAT.

La validación de esta pieza está supeditada a ensayos de cámara climática, resistencia a rayos UV y a no superar el límite de emisiones permitido. Además, al estar localizada en el interior del vehículo debe someterse a pruebas de emisión de olores a diferentes temperaturas. Al igual que ensayos de resistencia a roces y ralladuras.

Al igual que la carcasa de la llave, se trata de una pieza vista, por lo tanto, sería necesario someter las piezas a distintos postprocesos para satisfacer los estándares de calidad de SEAT.

La pieza debe ser flexible, pero una gran ventaja es que no está sometida a grandes esfuerzos, lo que facilita el uso de una amplia gama de materiales. Entre las tecnologías analizadas para fabricar esta pieza, se ha seleccionado la tecnología de resina fotosensible SLA. Esta es la más apropiada para piezas flexibles, pero la pieza no es completamente inodora, lo que provoca que esta pieza no sea viable aún y se encuentre en fase de desarrollo.

## 5.2. Soporte VIP Pedal:

El soporte de la centralita VIP Pedal es una de las piezas seleccionadas para realizar el estudio de viabilidad. La centralita VIP Pedal es una de las piezas gestionadas por el departamento de desarrollo eléctrico de SEAT. Está situada en la parte posterior del vehículo, concretamente en un lateral del difusor y va fijada al soporte mediante una estructura de clipajes. Esta centralita pertenece al sistema de control de sensores para la apertura automática del maletero, es la encargada de recopilar la información que generan los sensores de proximidad y de procesarla. Cuando el usuario pasa el pie por debajo del parachoques, los sensores lo detectan, emiten la señal a la centralita y esta acciona el motor que abre el maletero.

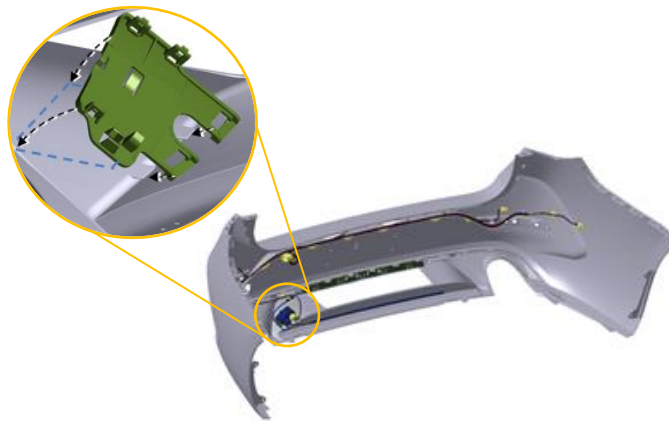


Fig. 5.2.a Ubicación de soporte VIP Pedal (difusor).

El soporte de la centralita también pertenece al departamento de desarrollo eléctrico. Se trata de una pieza no vista y va fijada a la superficie de contacto del vehículo mediante una tira de adhesivo de doble cara. Concretamente esta pieza, está diseñada para un coche de gama alta de SEAT, un vehículo CUPRA, es un coche de serie corta, es decir, se fabrican pocas unidades de este modelo. Además, este coche tiene dos variantes, según el motor que lleve, lo que provoca que se hayan diseñado dos geometrías de soportes de VIP Pedal ligeramente diferentes. En este proyecto se trabaja con una de las variantes únicamente.

Se ha seleccionado el soporte VIP Pedal para hacer el análisis de viabilidad puesto que se trata de una pieza que originalmente es de polipropileno, pertenece a un modelo de vehículo de serie corta y su tamaño es pequeño. Cumple todos los requisitos para ser fabricada mediante tecnología de fabricación aditiva.

Este soporte es considerablemente más pequeño que el soporte E-noise, que corresponde a la siguiente pieza que se analiza en este proyecto. De esta forma, tal y como hemos comentado con anterioridad, se podrá comprobar si el tamaño de la pieza afecta de forma considerable al coste unitario de fabricación de esta.

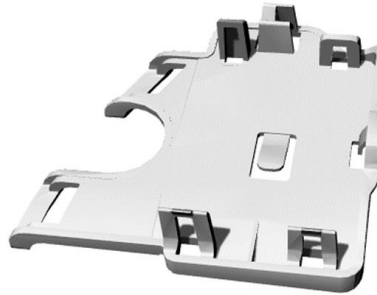


Fig. 5.2.b Soporte VIP Pedal.

Actualmente, esta pieza se fabrica mediante tecnología de molde de inyección y el material utilizado es polipropileno reforzado con un 20% de carga de fibra de vidrio (PP GF 20). Su posicionamiento viene ayudado por unas pestañas que son de diferente longitud en función del motor que lleva el vehículo. El número de piezas de este tipo que se ha estimado que se deben fabricar para el modelo de vehículo CUPRA es de alrededor a 9.000 unidades.

Las pruebas que debe superar esta pieza para obtener el BMG según la normativa VW son: ensayos de vibración en los 3 ejes y a diferente temperatura dentro de una cámara climática.

### 5.2.1. Proceso de desarrollo

La geometría del soporte VIP Pedal que se utiliza en este proyecto corresponde al de la pieza diseñada por proyectistas del departamento de desarrollo eléctrico de centro técnico de SEAT. Originalmente, esta pieza está diseñada para la fabricación por molde de inyección. De esta forma se puede realizar una comparativa totalmente verídica entre las piezas obtenidas por métodos de inyección por molde y las obtenidas por métodos de fabricación aditiva.

Se preparará la pieza para fabricación aditiva procesando la geometría CAD de la pieza mediante un software especializado para esta tecnología que convierte el archivo de la pieza a un formato .STL (*Standard Triangle Language*). A continuación, a partir de otro software, se genera el código que contiene las trayectorias que debe seguir la impresora 3D para fabricar la pieza capa por capa.

En el caso de la producción del soporte VIP Pedal se abren dos vías de investigación. La primera es la fabricación de piezas mediante la tecnología Multi jet fusion (MJF), en este caso se hace directamente en SEAT, utilizando la impresora MJF 4200 de HP que posee la empresa en sus instalaciones de prototipado (CPD). La segunda vía corresponde a piezas obtenidas por estereolitografía (SLA), esta se lleva a cabo mediante un proveedor externo, Carbon3D, que aporta las piezas necesarias para efectuar los ensayos requeridos.

Para ambos métodos de fabricación es necesario un postproceso. En el caso de los soportes generados por SLA se realiza directamente en la fábrica de Carbon3D. En cambio, para las piezas de MJF el postproceso se ejecuta en SEAT.

### **5.2.2. Proceso de fabricación**

#### **Fabricación de soporte VIP Pedal con MJF (en SEAT)**

El soporte VIP Pedal que se fabrican en SEAT se hace en el centro de prototipos en desarrollo (CPD) a partir de la tecnología multi jet fusion. En este centro se dispone de una impresora MJF 4200 de HP con la cual habitualmente se fabrican prototipos de piezas del vehículo. Se utilizan los materiales PA 11, PA 12 y PA 12 GB para obtener los soportes.

El proceso de fabricación del soporte se inicia con la preparación del diseño para la tecnología multi jet fusión. A partir de la geometría de la pieza en formato .STL se genera el código de trayectorias utilizando un software proporcionado por HP. Se define la posición en la que las piezas van a ser fabricadas dentro de la cubeta y se envía el trabajo a la impresora.

Antes de iniciar la impresión, se debe preparar la máquina. Se añade material en forma de polvo en la estación de procesado, el 80% de este es reutilizado de la impresión anterior. Esta estación mezcla el material reutilizado con el 20% del nuevo de forma automática. Seguidamente, se introduce todo el material en la cubeta de forma compacta. La cubeta de polvo está incorporada en un carro móvil, también llamado unidad de fabricación 3D. Si se dispone de varios carros, se puede intercambiar un carro con piezas ya impresas por otro que contiene material virgen entre impresión e impresión, agilizando así el proceso.

A continuación, se extrae la unidad de fabricación 3D de la estación de procesado y se introduce en la impresora MJF 4200 de HP. Se selecciona el archivo que contiene el código de impresión de la pieza y se presiona el botón *start*. A partir de ese momento la máquina trabaja de forma autónoma durante 16h hasta finalizar el proceso de fabricación de las piezas.

Una vez finalizado el proceso de impresión 3D, se extrae la unidad de fabricación de la MJF y se deja enfriar a temperatura ambiente, durante 30h. Una vez superado el tiempo de enfriamiento comienza el postproceso.

El resultado de la impresión es un bloque compacto de polvo, el cual contiene las piezas impresas en su interior. El postproceso básico que se realiza después de cada ciclo de impresión es la separación de dichas piezas respecto al bloque, una a una. Después, se debe hacer un pulido por vibrado abrasivo para quitar los restos de material que puedan quedar incrustados en la pieza final.

En este momento, la pieza ya se encuentra en condiciones de ser montada en el vehículo, pero se puede someter a postprocesos opcionales para obtener un mejor acabado superficial. Es posible hacer un proceso de limpieza manual, un tintado de la pieza o incluso un pulido químico para dejar el soporte completamente liso.

Para el soporte VIP Pedal, al ser una pieza no vista, únicamente se le exige un postproceso de separación de cada pieza respecto del bloque de polvo de forma manual y un pulido por vibrado abrasivo. Por lo tanto, es posible ahorrarse los postprocesos opcionales que normalmente encarecen considerablemente el coste unitario de las piezas.

#### **Fabricación de soporte VIP Pedal con SLA (externamente)**

A diferencia de las piezas producidas en SEAT, estos otros soportes VIP Pedal se han obtenido mediante estereolitografía (SLA) a través de un proveedor externo, Carbon3D. La empresa Carbon3D está especializada en fabricación digital, tiene su sede en California y fue fundada en 2013.

El proceso de fabricación de este tipo de soportes se ha iniciado con el envío del archivo CAD que contiene la geometría virtual de la pieza directamente al desarrollador de Carbon3D. A lo largo de una serie de reuniones se han establecido las necesidades de la pieza, es decir, las zonas donde está previsto que la pieza debe resistir más esfuerzo. De esta forma, el desarrollador de Carbon3D ha orientado la pieza virtualmente de forma que en el momento de fabricarla con su propia impresora de SLA, la pieza se confeccione en una posición adecuada para poder cumplir con los requisitos mecánicos solicitados.

Una vez fabricadas varias piezas con los dos materiales de Carbon3D seleccionados (RPU 70 y RPU 130), la empresa ha enviado dichos soportes desde Estados Unidos hasta España, concretamente al Centro Técnico de SEAT en Martorell. Las piezas llegan con el postproceso ya realizado, que en este caso consiste en la retirada de los soportes de resina utilizados para fabricar cada pieza.



### 5.2.3. Prueba de vibración de soporte VIP Pedal para validación BMG

En el momento en que se dispone de las piezas físicas del soporte VIP Pedal obtenidas por fabricación aditiva tanto en SEAT como en el proveedor externo, se inicia el proceso de ensayos de vibración de los soportes, descritos en el apartado 4.5.

Se ensayan varios soportes VIP Pedal producidos con distintos materiales para comprobar si estos soportes fabricados por impresión 3D pasan las pruebas para ser validados con BMG. Si superan estas pruebas, se consideran aptas para introducirlas en vehículos como piezas serie.

Los ensayos se realizan en el laboratorio de vibraciones de SEAT, para ello se ha diseñado un utillaje que simula la zona trasera del vehículo donde va posicionado el soporte de la centralita VIP Pedal. Este soporte se une al parachoques trasero mediante un adhesivo de doble cara, la centralita se fija al soporte mediante clipaje, concretamente 4 pestañas.

La metodología seguida para esta prueba es la siguiente: Inicialmente se ensaya cada pieza únicamente en el eje Z (el más crítico) y a diferentes temperaturas (de -40°C a 75°C) durante 16h. Los soportes seleccionados para dichos ensayos son los obtenidos mediante la máquina de MJF disponible en SEAT con los materiales: PA 12, PA 12 GB y los fabricados por Carbon3D con la tecnología SLA con los materiales: RPU 70 y RPU 130. Las piezas que superan la prueba inicial se postulan como candidatas para hacer el ensayo completo.

- Se inician los ensayos con el soporte VIP Pedal RPU 130 el día 20/02/2020: Se hacen fotografías del soporte y la centralita que se van a ensayar. Se retira el protector de adhesivo y se coloca en la ubicación adecuada. Se mantiene presionada la pieza varios minutos hasta que queda totalmente pegada. Al colocar la centralita, la pestaña superior izquierda no resiste el clipaje y se rompe. Se retira la pieza y el adhesivo y se limpia la superficie con alcohol. Se considera pieza fallida.



Fig. 5.2.3.a Soporte VIP Pedal RPU 130  
(Zona inferior).



Fig. 5.2.3.b Soporte VIP Pedal RPU 130  
(Zona superior).



- A continuación, se coloca el soporte VIP Pedal PA 12 GB el mismo día 20/02/2020: Se hacen fotografías del soporte y la centralita que se van a ensayar. Se retira el protector de adhesivo y se coloca en la ubicación adecuada. Se mantiene presionada la pieza varios minutos hasta que queda totalmente pegada. Se clipa la centralita y el utillaje está listo. Se inicia la vibración en Z y con variación de temperatura (de -40°C a 75°C) durante 16h siguiendo la norma VW 80200-2. El día 24/02/2020 se analiza el resultado de la prueba: completada con éxito, la centralita sigue fijada y el soporte no tiene ni deformaciones ni fisuras. Además, permite el clipaje y desclipaje sin problemas.



Fig. 5.2.3.c Soporte VIP Pedal PA 12 GB utilizado en un ensayo.

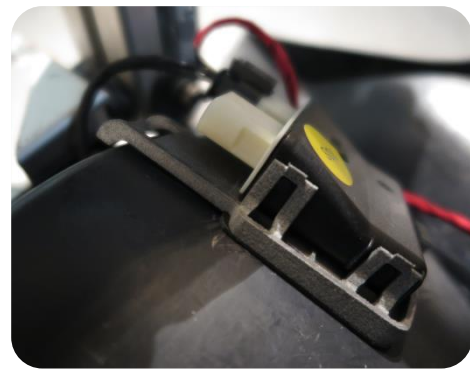


Fig. 5.2.3.d Centralita y soporte VIP Pedal PA 12 GB montados en el utillaje.

- El siguiente ensayo se inicia el día 24/02/2020 con el soporte VIP Pedal RPU 70 liso. Se hacen fotografías del soporte y la centralita que se van a ensayar. Se retira el protector de adhesivo y se coloca en la ubicación adecuada. Se mantiene presionada la pieza varios minutos hasta que queda totalmente pegada. Se clipa la centralita y el utillaje está listo. Se inicia la vibración en Z y con variación de temperatura (de -40°C a 75°C) durante 16h siguiendo la norma VW 80200-2 del consorcio. Una vez finalizado el ensayo la pieza presenta deformaciones respecto a la geometría original y se considera no apta.



Fig. 5.2.3.e Soporte VIP Pedal RPU 70 utilizado en un ensayo.

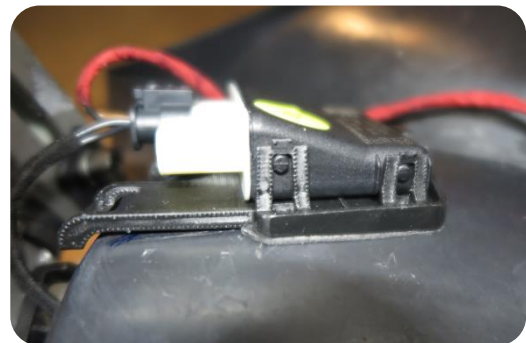


Fig. 5.2.3.f Centralita y soporte VIP Pedal RPU 70 montados en el utillaje.

- Por último, se ensaya el soporte VIP Pedal de PA 12. Se hacen fotografías del soporte y la centralita que se van a ensayar. Se retira el protector de adhesivo y se coloca en la ubicación adecuada. Se mantiene presionada la pieza varios minutos hasta que queda totalmente pegada. Se clipa la centralita y el utillaje está listo. Se inicia la vibración en Z y con variación de temperatura (de -40°C a 75°C) durante 16h siguiendo la norma VW 80200-2 del consorcio.

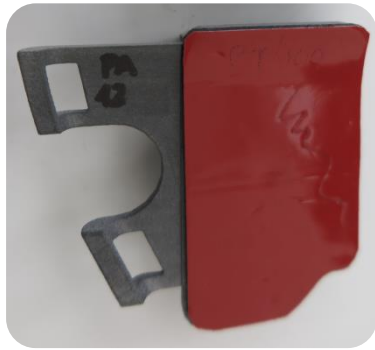


Fig. 5.2.3.g Soporte VIP Pedal PA 12 utilizado en un ensayo.

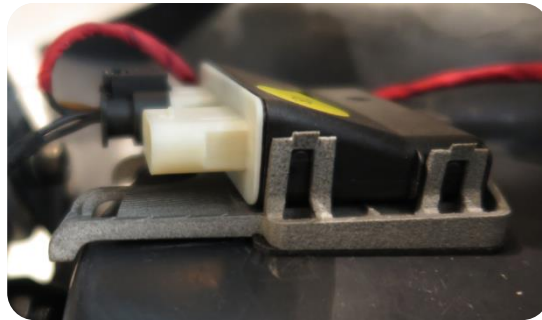


Fig. 5.2.3.h Centralita y soporte VIP Pedal PA 12 montados en el utillaje.

El ensayo del soporte VIP Pedal de PA 11 no se realiza debido a que las propiedades son similares al material PA 12 y tiene un coste económico más elevado, como se ve posteriormente en el análisis de viabilidad económica.

Al finalizar la primera fase de ensayos, se descarta los soportes VIP Pedal fabricados con la tecnología SLA de Carbon3D dado que no resisten los ensayos de vibración en eje Z con variación de temperatura. Por otra parte, se aceptan los soportes fabricados con la tecnología MJF de HP compuestos de PA 12 y PA 12 GB para realizar el ensayo completo.

Dado que se trata de un análisis de viabilidad, mediante estos ensayos de vibración se ha demostrado que actualmente existen tecnologías de fabricación aditiva, MJF en este caso, que permiten fabricar piezas que superan las mismas pruebas a las que están sometidas las piezas obtenidas mediante molde de inyección. Son pruebas que tratan de simular situaciones límite, con fuertes vibraciones y diferencias de temperaturas extremas.

Una vez verificado que los soportes VIP Pedal de PA 12 y PA 12 GB superan la prueba, pasan a ser las piezas seleccionadas para realiza un análisis económico.

#### 5.2.4. Análisis económico de fabricación de soporte VIP Pedal

Una vez realizados los ensayos de vibración donde se ha comprobado que los soportes obtenidos mediante MJF en SEAT son los únicos que superan las pruebas, cabe analizar si este proyecto es económicamente viable. Dicho estudio se ha realizado después de fabricar los primeros prototipos de piezas de fabricación aditiva, de esta forma, se recogen datos verídicos y necesarios para calcular el coste unitario real.

Tal y como se ha especificado en el apartado 3.6 de viabilidad económica, se procede a calcular y comparar el coste unitario del soporte VIP Pedal entre la tecnología de fabricación aditiva de tipo MJF y tecnologías de inyección de molde. También se expone el coste del soporte fabricado por un proveedor externo mediante SLA.

Esta pieza ha sido seleccionada para realizar este proyecto por su tamaño y porque pertenece a un modelo de vehículo con un volumen de tirada bajo. Únicamente ocupa 14,8 cm<sup>3</sup> y se prevé que tendrá una demanda de 9.346 piezas a lo largo de 9 años, en lotes de entrega de 150 piezas.

#### Coste unitario de soporte VIP Pedal fabricado por molde de inyección

El soporte VIP Pedal utilizado actualmente se fabrica mediante polipropileno reforzado con un 20% de carga de fibra de vidrio (PP GF 20). Esta pieza es fabricada por un proveedor de SEAT que ha aportado los datos necesarios para calcular el coste unitario. El coste unitario se calcula usando la ecuación 3.6.8:

$$\begin{aligned} \text{Coste u pieza} &= \text{Coste molde/u} + \text{Coste tooling/u} + \text{Coste fabricación/u} = \\ &= \frac{\text{Coste molde}}{u \text{ previstas ambas variables}} + \mathbb{Z} \left[ \frac{u \text{ fabricadas}}{\text{volumen lote}} \right] \cdot \frac{\text{Coste run of tool}}{u \text{ fabricadas}} + \text{Coste fabricación/u} \end{aligned}$$

El coste de desarrollo y fabricación del molde en el cual se inyectará el polipropileno para esta pieza es de 36.000€. El proveedor no incluye el coste de *run of tool* entre lotes. Este coste corresponde al valor que carga el proveedor a SEAT por montar el molde en la máquina inyectora cada vez que la empresa pide un lote de piezas. Por último, el coste de fabricación unitario equivale a 1,71 € por soporte.

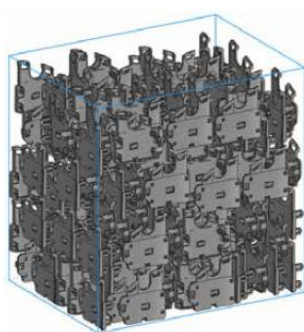
$$\text{Coste u pieza} = \frac{36.000}{9.346} + 0 + 1,71 = 5,57€/u$$

Introduciendo los datos proporcionados en la ecuación 3.6.8 se obtiene un coste unitario de pieza por molde de inyección de 5,57 €/u.

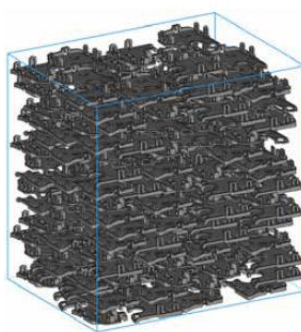
### Coste unitario de soporte VIP Pedal fabricado con tecnología MJF

Las piezas resultantes de la fabricación aditiva tienen propiedades mecánicas anisotrópicas. Según se programe la orientación de la pieza para ser fabricada, se obtendrá unas determinadas características mecánicas en una posición u otra.

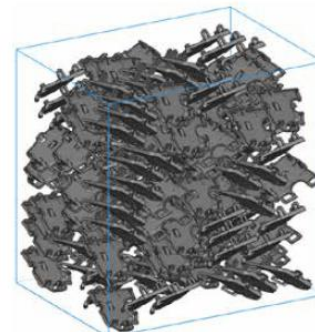
Se ha estimado que existen tres posibles orientaciones dentro del depósito de polvo de la impresora MJF 4200 de HP. Si se coloca la pieza de forma vertical, se mejoran la resistencia a clipaje de las pestañas de la pieza. En cambio, para una orientación horizontal, se posibilita que quepa el máximo número de piezas en la cubeta, aumentando así la productividad. También existe la opción de imprimir la pieza de forma inclinada, mejorando la resistencia de toda la pieza, pero disminuyendo la capacidad de producción.



Orientación vertical  
204 u/ciclo



Orientación horizontal  
210 u/ciclo



Orientación inclinada  
146 u/ciclo

Fig. 5.2.4.a Simulación de cantidades distintas de soportes VIP Pedal en el interior de la cubeta de la máquina MJF según su orientación.

El número de piezas que se puede obtener en un ciclo de impresión viene dado en función de la orientación seleccionada para fabricar las piezas, la orientación horizontal permite fabricar 210 unidades por ciclo mientras que la orientación inclinada permite 146 unidades.

Para calcular el coste por pieza se tiene en cuenta costes fijos y variables:

- En costes fijos: se incluye el coste de amortización o alquiler de la impresora 3D y el de servicio de mantenimiento. En SEAT se dispone de la impresora Multi jet fusion 4200 con una modalidad de renting de HP con un coste de 7.100 €/mes. La adquisición de la máquina supondría una inversión de en torno a 200.000 €, lo que encarecería el coste por pieza al incluir la amortización de la impresora hasta el punto de no ser rentable.

- **En costes variables:** se cuenta con el valor de los consumibles: material, agentes, cabezales, elementos de iluminación y filtros. Se ahorra gran cantidad de material gracias a la capacidad de fabricar piezas a partir de polvo reutilizado de otras impresiones. Según el tipo de material, se puede reutilizar entorno a un 70-80% de material.

A continuación, se muestra el cálculo de coste unitario del soporte VIP Pedal de PA 12 con una orientación inclinada (146 unidades por ciclo). Con esta orientación se obtendrá el coste unitario más elevado en relación a las otras dos disponibles, pero da como resultado una pieza con las mejores propiedades mecánicas posibles. Se realiza el cálculo mediante la ecuación 3.6.1 descrita en el apartado análisis de costes:

$$\text{Coste u pieza} = \text{Coste material/u} + \text{Coste electricidad/u} + \text{Coste postproceso/u} \\ + \text{Coste fallo/u} + \text{Coste operario/u} + \text{Coste amortización o alquiler/u}$$

Esta pieza tiene un volumen de  $14,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  y está fabricada con poliamida 12, un material de una densidad de  $1.020 \text{ kg/m}^3$ , por lo tanto, el peso de esta pieza será de  $15 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ . El coste de este material es de  $9,5 \text{ €/kg}$ . Para calcular el material desechado en cada ciclo (en el caso de PA un 20%) se debe tener en cuenta la cantidad de material que hay en una cubeta de la MJF sin contar el volumen que ocupan las propias piezas que se fabrican. La cubeta tiene una capacidad de 41l ( $41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ), un total de 146 soportes ocupan  $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , así pues, el volumen de material de una cubeta sin piezas es  $38,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ . Este volumen en material PA 12 equivale a 39,678 kg, un 20% de esta cantidad resulta 7,935 kg. Utilizando la ecuación 3.6.2:

$$\text{Coste material/u} = \left( \text{Peso pieza(kg)} + \frac{\text{Material desechado por ciclo(kg)}}{\text{Nº piezas tipo por ciclo}} \right) \cdot \text{Coste material(€/kg)}$$

$$\text{Coste material/u} = \left( 0,015 + \frac{7,935}{146} \right) \cdot 9,5 = \mathbf{0,6590 \text{ €/u}}$$

Para obtener el coste de electricidad asociado a cada pieza, se ha calculado en base a un coste medio de electricidad de  $0,129 \text{ €/kWh}$ , un tiempo por ciclo de 16h y un consumo de la máquina de 10,5 kW. Utilizando la ecuación 3.6.3:

$$\text{Coste electricidad/u} = \frac{\text{Tiempo por ciclo(h)} \cdot \text{Consumo impresora 3D(kW)} \cdot \text{Precio electricidad(€/kWh)}}{\text{Nº piezas tipo por ciclo}}$$

$$\text{Coste electricidad/u} = \frac{16 \cdot 10,5 \cdot 0,129}{146} = \mathbf{0,1484 \text{ €/u}}$$

Como se ha comentado anteriormente, se trata de una pieza no vista, por tanto, únicamente se aplicará un pulido por vibrado abrasivo como postproceso. Utilizando la ecuación 3.6.4:

$$\text{Coste postproceso/u} = \text{Proceso de limpieza} + \text{Tintado} + \text{Pulido químico/vibrado}$$

$$\text{Coste postproceso/u} = 0 + 0 + 0,10 = \mathbf{0,1000 \text{ €/u}}$$

El porcentaje de fallos para este tipo de piezas es del orden de 2 ciclos completos, es decir, el 2% del total de piezas. En este cálculo también participa la cantidad de material desechado asociado a los ciclos fallidos. Utilizando la ecuación 3.6.5:

$$\text{Coste fallo/u} = \text{Piezas fallidas(\%)} \cdot \left( \text{Peso pieza(kg)} + \frac{\text{Material desechado/ciclo(kg)}}{\text{Nº piezas tipo por ciclo}} \right) \cdot \text{Coste material(€/kg)}$$

$$\text{Coste fallo/u} = 0,02 \cdot \left( 0,015 + \frac{7,935}{146} \right) \cdot 9,5 = \mathbf{0,0132 \text{ €/u}}$$

Para el cálculo del coste por operario, se ha estimado que las horas de preparación de la máquina y mezcla de materiales corresponde a 2h y proceso de separar los soportes del bloque de polvo final equivale a 4h, un total de 6h de trabajo de operario por ciclo. Para SEAT, el coste que se asocia a un operario únicamente para producción corresponde a 30€/h, el resto de salario por I+D se contabilizaría aparte. Utilizando la ecuación 3.6.6:

$$\text{Coste operario/u} = \frac{\text{Tiempo preparacion máquina(h)} \cdot \text{Coste del operario(€/h)}}{\text{Nº piezas tipo por ciclo}}$$

$$\text{Coste operario/u} = \frac{6 \cdot 30}{146} = \mathbf{1,2329 \text{ €/u}}$$

Por último, el coste de amortización de la impresora va directamente asociado con el número de piezas fabricadas por ciclo, en este caso 146 unidades. Se debe considerar el coste de renting de la impresora que se va a utilizar MJF 4200 HP, que es 7.100€/mes. También el número de ciclos que se puede realizar por día, 1 ciclo, y los días que puede trabajar la máquina en un mes, se cuenta con 22 días. Utilizando la ecuación 3.6.7:

$$\text{Coste amortización o alquiler/u} = \frac{\text{Coste renting de impresora/mes(€/mes)}}{\text{Nº piezas/ciclo} \cdot \text{Nº ciclos/día} \cdot \text{Nº días trabajo máquina/mes}}$$

$$\text{Coste amortización o alquiler/u} = \frac{7.100}{146 \cdot 1 \cdot 22} = \mathbf{2,2105 \text{ €/u}}$$

La suma de costes desglosados resulta un coste unitario de soporte VIP Pedal de **4,36 €/u**.



En el caso de añadir postprocesos para un mejor acabado superficial, se suma un *bead blasting* manual que es un proceso de limpieza (+0,58 €/u) y un tintado (+0,45 €/u). Obteniendo un coste unitario con postprocesos opcionales de 5,39 €/u.

Para completar el estudio, se utilizan las mismas fórmulas para calcular los costes unitarios de los posibles casos de piezas fabricadas con los materiales: PA 12, PA 12 GB y PA 11.

Se realizan estos cálculos centrándose en dos posibles orientaciones: Orientación inclinada (146 piezas por ciclo) porque con esta posición se mejora la resistencia global de la pieza y orientación horizontal (210 piezas por ciclo) con la intención de fabricar el máximo de piezas por ciclo de impresión. Si se fabrica en orientación horizontal, en vez de vertical, se puede reducir el coste unitario por pieza hasta un 29%.

	Nº piezas por ciclo	Coste de material (€/u)	Coste de electricidad (€/u)	Coste por post-proceso (€/u)	Coste de piezas fallidas (€/u)	Coste de operario (€/u)	Coste de amortización (€/u)	Coste Unitario (€/u)
PA 12	146	0,66	0,15	0,10	0,01	1,23	2,21	4,36
	210	0,49	0,10	0,10	0,01	0,86	1,54	3,10
PA 12 GB	146	1,11	0,15	0,10	0,02	1,23	2,21	4,83
	210	0,83	0,10	0,10	0,02	0,86	1,54	3,45
PA 11	146	1,21	0,15	0,10	0,02	1,23	2,21	4,92
	210	0,90	0,10	0,10	0,02	0,86	1,54	3,52

Tabla 3. Costes unitarios desglosados según material y orientación en la cubeta.

## Comparativa de tecnologías: MJF y molde de inyección

A continuación, se muestra la comparativa de coste de fabricación aditiva (MJF): **4,36 €/u** respecto al valor unitario de piezas fabricadas por molde de inyección: **5,57 €/u**. También se compara respecto al coste por fabricación aditiva realizando los postprocesos opcionales de *bead blasting* (+0,58 €/u) y tintado (+0,45 €/u).

	Nº piezas por ciclo (orientación)	COSTE UNITARIO (€/u)	Comparativa con molde de inyección	COSTE UNITARIO + Post-procesos (€/u)	Comparativa con molde de inyección
PA 12	146 (Inclinado)	4,36	-21,6 (%) ↓	5,39	- 3,2 (%) ↓
	210 (Horizontal)	3,10	-44,3 (%) ↓	4,13	-25,8 (%) ↓
PA 12 GB	146 (Inclinado)	4,83	-13,3 (%) ↓	5,86	+5,2 (%) ↑
	210 (Horizontal)	3,45	-38,1 (%) ↓	4,48	-19,6 (%) ↓
PA 11	146 (Inclinado)	4,92	-11,6 (%) ↓	5,95	+6,9 (%) ↑
	210 (Horizontal)	3,52	-36,8 (%) ↓	4,55	-18,3 (%) ↓

Tabla 4. Costes unitarios y costes unitarios más postprocesos desglosados según material y orientación en la cubeta. Y comparativa con molde de inyección.

De este estudio económico se concluye que utilizando la tecnología de fabricación aditiva MJF de HP se reduce el coste unitario (en la mayoría de los casos) respecto a la fabricación tradicional de molde de inyección.

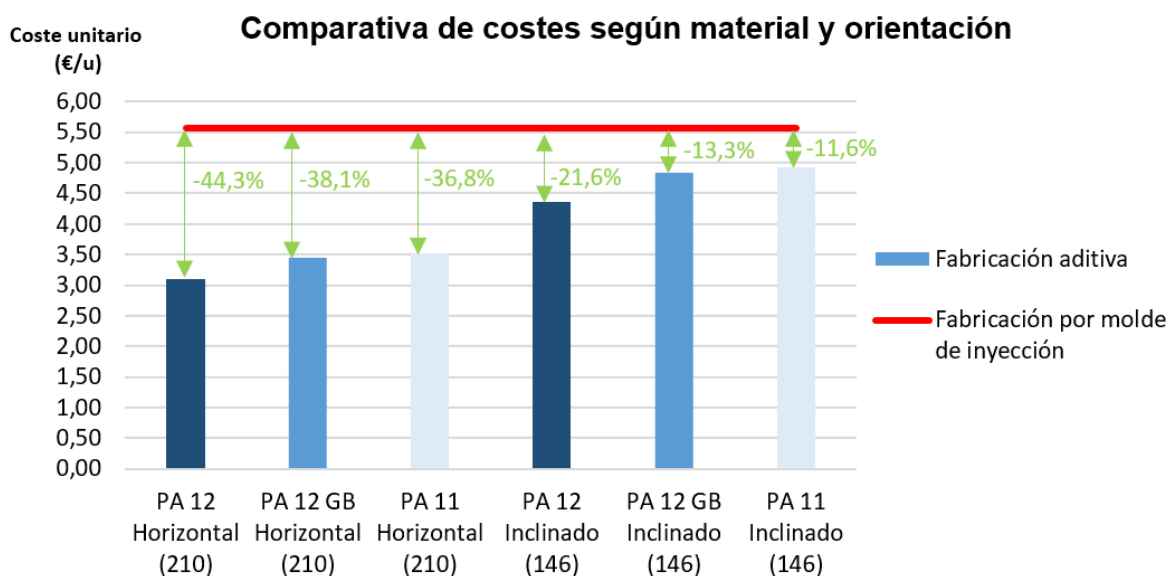


Fig. 5.2.4.b Grafico representativo del coste unitario de piezas obtenidas por fabricación aditiva, según material y orientación, frente al coste unitario por molde de inyección.



Utilizando la tecnología multi jet fusion se puede llegar a alcanzar un ahorro del 44,3% respecto a la fabricación convencional si: se utiliza PA 12 y si se posicionan las piezas de forma horizontal. Contando con que no se realizan los postprocesos opcionales.

Tras obtener muestras del soporte VIP Pedal fabricadas con la impresora MJF 4200 de HP con distintos materiales, el departamento de control y calidad de SEAT ha analizado las propiedades mecánicas de dichos soportes y ha obtenido los siguientes resultados:

	PA12	PA 12 GB
Resistencia a tracción en ejes X/Y	48 MPa	30 MPa
Resistencia a tracción en ejes Z	50 MPa	32 MPa
Modulo elástico en ejes X/Y	1.700 MPa	2.800 MPa
Modulo elástico en eje Z	2.000 MPa	3.100 MPa
Deformación a la rotura en ejes X/Y	20%	6,5%
Deformación a la rotura en eje Z	15%	7,0%
Res. impacto Charpy entalla +23°C X/Y	3,5 kJ/m <sup>2</sup>	2,7 kJ/m <sup>2</sup>
Res. impacto Charpy entalla +23°C Z	4,2 kJ/m <sup>2</sup>	3,0 kJ/m <sup>2</sup>
Temperatura de deflexión térmica (1,82 MPa)	95°C	120°C

Tabla 5. Propiedades mecánicas de piezas fabricadas con PA 12 y PA 12 GB.

Tal y como se ha comentado en el apartado 5.2.3 de ensayos de vibración, se descarta el uso del PA 11 para los ensayos de VIP Pedal, las propiedades mecánicas son similares a las del PA 12 y no supone suficiente ahorro de coste unitario como con el resto de los materiales. Por lo tanto, no se dispone de los datos de propiedades mecánicas de piezas con este material.

### **Coste unitario de soporte VIP Pedal fabricado con tecnología SLA**

Las piezas obtenidas mediante la tecnología de estereolitografía no han superado los ensayos de vibración, por lo tanto, no son viables para ser introducidos en vehículos de SEAT.

Las piezas proveídas por parte de la empresa Carbon3D mediante SLA están hechas con los materiales RPU 70 y RPU 130 debido a su comportamiento mecánico. El coste de desarrollo y de transportes han sido asumidos por parte de la empresa proveedora puesto que se trata de unas piezas en proceso de validación. El coste unitario de soporte VIP Pedal que ha asumido SEAT ha sido de 35 €/u para ambos tipos de material.

### 5.3. Soporte E-noise

El soporte E-noise es la segunda pieza seleccionada por este proyecto para ser ensayada de forma real siendo obtenida por fabricación aditiva. Se trata de una pieza que actúa como soporte de la centralita E-noise. Esta centralita controla el altavoz SoundBox, que es el encargado de simular el sonido de un coche para vehículos eléctricos. Está situada bajo el asiento delantero derecho, se trata de una pieza interior no vista.

Se ha seleccionado el soporte E-noise porque es una pieza que va montada en una variedad de un modelo de vehículo eléctrico que tiene previstas pocas unidades de lanzamiento, en concreto 8.000 unidades. Además, a diferencia del soporte VIP Pedal, se trata de una pieza de dimensiones considerablemente grandes. De esta forma se puede comparar mejor como varía el coste unitario en función del tamaño de la pieza.

Es una pieza de material plástico con un peso relativamente alto y su geometría tiene grandes áreas sin fijaciones, por lo tanto, también se considera como una pieza candidata para desarrollar un diseño generativo.

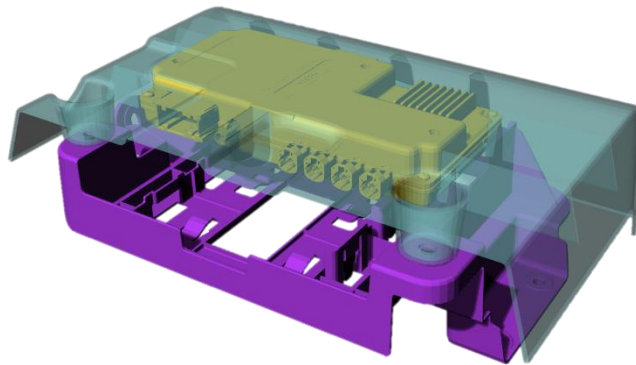


Fig. 5.3 Soporte y centralita E-noise.

Este soporte actualmente se está fabricando mediante tecnología de molde de inyección y tiene una geometría compleja, lo que implica que el coste del molde es elevado. La primera versión de la pieza diseñada para inyección tiene una volumetría de 300x183x102mm aproximadamente, con un volumen de material de  $171,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ . Este soporte tiene 3 anclajes fijados (atornillado) y clipaje para el dispositivo electrónico.

Debido a una previsión de costes elevados de fabricación, se realiza el análisis económico antes de iniciar con los ensayos. En el caso de que sea económicamente inviable, no se procedería a ensayar la pieza.

### 5.3.1. Proceso de desarrollo

La geometría del soporte E-noise que se utiliza en este proyecto corresponde al de la pieza diseñada por proyectistas del departamento de desarrollo eléctrico de centro técnico de SEAT. Originalmente, esta pieza está proyectada para la fabricación por molde de inyección.

Se prepara la pieza para fabricación aditiva procesando la geometría CAD de la pieza mediante un software especializado para esta tecnología que convierte el archivo de la pieza a un formato .STL (Standard Triangle Language). A continuación, a partir de otro software, se genera un código, que contiene las trayectorias que debe seguir la impresora 3D para fabricar la pieza capa por capa. El software para la obtención de este código depende del tipo de fabricación aditiva que se vaya a utilizar.

Debido al gran tamaño del soporte E-noise se descarta la posibilidad de fabricar la pieza mediante estereolitografía (SLA). Por lo tanto, se orienta esta pieza para ser fabricada por tecnología Multi jet fusion (MJF), en este caso se hace directamente en SEAT, utilizando la impresora MJF 4200 de HP que posee la empresa en sus instalaciones de prototipado (CPD).

Paralelamente, se ha trabajado con la empresa Leitat Technological Center con la intención de fabricar este soporte con diseño generativo. Además, se han desarrollado varias estrategias para orientar las piezas de tal forma que se puedan imprimir el máximo de piezas por ciclo en la cubeta de la máquina MJF de HP.

### 5.3.2. Análisis económico de fabricación de soporte E-noise

Como se especifica en el apartado 3.6 de viabilidad económica, se procede a calcular y comparar el coste unitario del soporte E-noise entre la tecnología de fabricación aditiva de tipo MJF y tecnologías de inyección de molde.

#### Coste unitario de soporte E-noise fabricado por molde de inyección

Actualmente, el soporte E-noise lo fabrica un proveedor externo de SEAT. Dicho proveedor ha aportado los datos necesarios para calcular el coste unitario. El coste unitario se calcula en base a la ecuación 3.6.8:

$$\begin{aligned} \text{Coste u pieza} &= \text{Coste molde/u} + \text{Coste tooling/u} + \text{Coste fabricación/u} = \\ &= \frac{\text{Coste molde}}{\text{u previstas ambas variables}} + \mathbb{Z} \left[ \frac{\text{u fabricadas}}{\text{volumen lote}} \right] \cdot \frac{\text{Coste run of tool}}{\text{u fabricadas}} + \text{Coste fabricación/u} \end{aligned}$$

El coste de desarrollo y fabricación del molde para esta pieza es de 61.500€. El proveedor no incluye el coste de *run of tool* entre lotes. Se tiene previsto fabricar 8.000 unidades y el coste de fabricación de cada una de ellas es de 1,16 €.

$$\text{Coste u pieza} = \frac{61.500}{8.000} + 0 + 1,16 = \mathbf{8,85\text{€/u}}$$

Introduciendo los datos proporcionados en la ecuación 3.6.8 se obtiene un coste unitario de pieza por molde de inyección de 8,85 €/u.

### Coste unitario de soporte E-noise fabricado con tecnología MJF

El volumen de la pieza soporte E-noise es realmente significativo si se compara con las dimensiones del depósito de polvo de la impresora MJF 4200 de HP. Por lo tanto, se pueden imprimir pocas piezas por ciclo, y el coste unitario de ellas estará en gran medida influido por la cantidad de piezas que se pueden fabricar por ciclo. Para obtener los soportes E-noise existen dos opciones posibles: sin superposición o con superposición.

Posicionando las piezas sin superposición, de forma que haya una mínima distancia entre ellas, se consigue obtener un máximo de 8 unidades por ciclo.

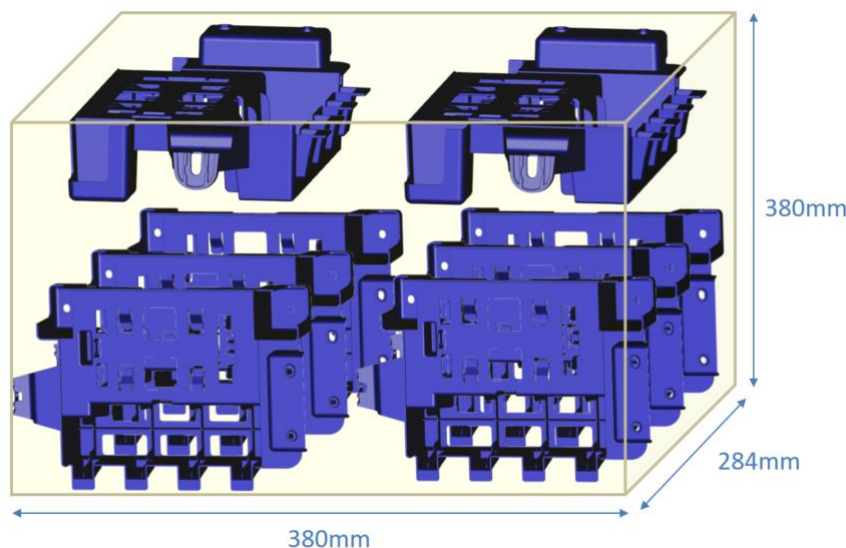


Fig. 5.3.2.a Simulación de cantidad de soportes E-noise que caben en la cubeta de la máquina MJF 4200 de HP sin superposición.

Mientras que, si se orientan las piezas con superposición, es decir, aprovechando los huecos de la propia pieza para fabricar una pieza metida parcialmente en el hueco de otra, se consigue obtener un máximo de 12 unidades por ciclo.

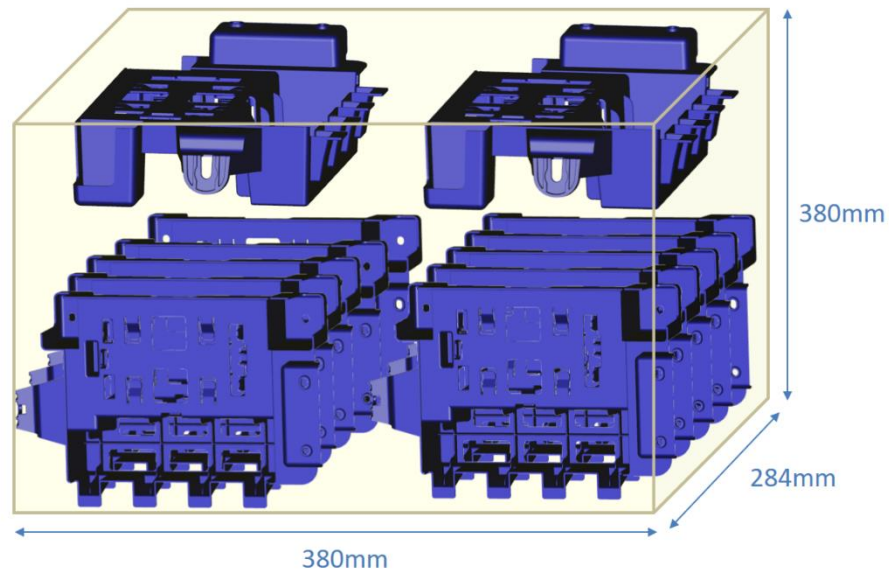


Fig. 5.3.2.b Simulación de cantidad de soportes E-noise que caben en la cubeta de la máquina MJF 4200 de HP con superposición.

Existen varios materiales disponibles para fabricar este soporte. Debido a su posicionamiento, los requerimientos mecánicos que debe tener son menos estrictos, por lo tanto, sería posible obtenerlo tanto de PA 11, PA 12 como PA 12 GF. Debido a criterios económicos, se realiza el estudio económico con PA 12.

Seguidamente, se muestra el cálculo de coste unitario del soporte E-noise de PA 12 con un posicionamiento de piezas sin superposición, es decir, se pueden fabricar 8 por ciclo. Se realiza el cálculo mediante la ecuación 3.6.1 descrita en el apartado análisis de costes:

$$\text{Coste u pieza} = \text{Coste material/u} + \text{Coste electricidad/u} + \text{Coste postproceso/u} \\ + \text{Coste fallo/u} + \text{Coste operario/u} + \text{Coste amortización o alquiler/u}$$

Esta pieza tiene un volumen de  $171,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  y está fabricada con poliamida 12, un material de una densidad de  $1.020 \text{ kg/m}^3$ , por lo tanto, el peso de esta pieza será de  $174,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ .

El coste de este material es de  $9,5 \text{ €/kg}$ . Para calcular el material desechado en cada ciclo (en el caso de PA un 20%) se debe tener en cuenta la cantidad de material que hay en una cubeta de la MJF sin contar el volumen que ocupan las propias piezas que se fabrican. La cubeta tiene una capacidad de  $41\text{l}$  ( $41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ), un total de 8 soportes ocupan  $1,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , así pues, el volumen de material de una cubeta sin piezas es  $39,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ . Este volumen en material PA 12 equivale a  $40,42 \text{ kg}$ , un 20% de esta cantidad resulta  $8,08 \text{ kg}$ . Utilizando la ecuación 3.6.2:

$$\text{Coste material/u} = \left( \text{Peso pieza(kg)} + \frac{\text{Material desechado por ciclo(kg)}}{\text{Nºpiezas tipo por ciclo}} \right) \cdot \text{Coste material(€/kg)}$$

$$\text{Coste material/u} = \left( 0,175 + \frac{8,08}{8} \right) \cdot 9,5 = \mathbf{11,26 \text{ €/u}}$$

Para obtener el coste de electricidad asociado a cada pieza, se ha calculado en base a un coste medio de electricidad de  $0,129 \text{ €/kWh}$ , un tiempo por ciclo de  $16 \text{ h}$  y un consumo de la máquina de  $10,5 \text{ kW}$ . Utilizando la ecuación 3.6.3:

$$\text{Coste electricidad/u} = \frac{\text{Tiempo por ciclo(h)} \cdot \text{Consumo impresora 3D(kW)} \cdot \text{Precio electricidad(€/kWh)}}{\text{Nºpiezas tipo por ciclo}}$$

$$\text{Coste electricidad/u} = \frac{16 \cdot 10,5 \cdot 0,129}{8} = \mathbf{2,709 \text{ €/u}}$$

Como se ha comentado anteriormente, se trata de una pieza no vista, por tanto, únicamente se aplicará un pulido por vibrado abrasivo como postproceso. Utilizando la ecuación 3.6.4:

$$\text{Coste post proceso/u} = \text{Proceso de limpieza} + \text{Tintado} + \text{Pulido químico/vibrado}$$

$$\text{Coste postproceso/u} = 0 + 0 + 0,10 = \mathbf{0,1 \text{ €/u}}$$

El porcentaje de fallos para este tipo de piezas es del orden de 2 ciclos completos, es decir, el 2% del total de piezas. En este cálculo también participa la cantidad de material desechado asociado a los ciclos fallidos. Utilizando la ecuación 3.6.5:

$$\text{Coste fallo/u} = \text{Piezas fallidas(\%)} \cdot \left( \text{Peso pieza(kg)} + \frac{\text{Material desechado/ciclo(kg)}}{\text{Nºpiezas tipo por ciclo}} \right) \cdot \text{Coste material(€/kg)}$$

$$\text{Coste fallo/u} = 0,02 \cdot \left( 0,175 + \frac{8,08}{8} \right) \cdot 9,5 = \mathbf{0,2252 \text{ €/u}}$$

Para el cálculo del coste por operario, se ha previsto que las horas de preparación de la máquina y mezcla de materiales corresponde a 1h 45min y proceso de separar los soportes del bloque de polvo final equivale a 15 minutos, un total de 2 horas de trabajo de operario por ciclo. Para SEAT, el coste que se asocia a un operario únicamente para producción corresponde a 30 €/h, el resto de salario por I+D se contabiliza aparte. Utilizando la ecuación 3.6.6:

$$\text{Coste operario/u} = \frac{\text{Tiempo preparacion máquina(h)} \cdot \text{Coste del operario(€/h)}}{\text{Nºpiezas tipo por ciclo}}$$

$$\text{Coste operario/u} = \frac{2 \cdot 30}{8} = 7,5\text{€/u}$$

Por último, el coste de amortización de la impresora va directamente asociado con el número de piezas fabricadas por ciclo, en este caso 8 unidades. Se debe considerar el coste de alquiler (renting) de la impresora que se va a utilizar MJF 4200 HP, que es 7.100€/mes. También el número de ciclos que se puede realizar por día, 2 ciclo, y los días que puede trabajar la máquina en un mes, se cuenta con 22 días. Utilizando la ecuación 3.6.7:

$$\text{Coste amortización o alquiler/u} = \frac{\text{Coste renting de impresora/mes(€/mes)}}{\text{Nºpiezas/ciclo} \cdot \text{Nºciclos/día} \cdot \text{Nºdías trabajo máquina/mes}}$$

$$\text{Coste amortización o alquiler/u} = \frac{7.100}{8 \cdot 2 \cdot 22} = 20,170\text{€/u}$$

La suma de costes desglosados resulta un coste unitario de soporte E-noise de **41,96 €/u**.

En el caso de añadir postprocesos para un mejor acabado superficial, se suma un *bead blasting* manual que es un proceso de limpieza (+0,58 €/u) y un tintado (+0,45 €/u). Obteniendo un coste unitario con postprocesos opcionales de 42,99€/u.

### Comparativa de tecnologías: MJF y molde de inyección

El coste unitario del soporte E-noise obtenido por fabricación aditiva (MJF) es de **41,96 €/u** y fabricado por molde de inyección es de **8,85 €/u**. Supone de una diferencia de coste realmente desorbitada, y no da opción a seguir estudiando piezas con tamaños iguales o superiores a los del soporte E-noise.

Por lo tanto, se renuncia al ensayo de vibraciones que se haría con este soporte porque por motivos económicos ya se ha declarado esta pieza como no viable para ser introducida en vehículos de serie corta de SEAT.



## 5.4. Comparativa entre el tamaño de la pieza y el coste unitario

A continuación, se muestra un gráfico que hace referencia al coste unitario de las piezas fabricadas con la tecnología MJF respecto a su tamaño. En los valores más pequeños del eje horizontal (15 cm<sup>3</sup>) se hace referencia a un tamaño equivalente al del soporte VIP Pedal, y en los valores más grandes del eje horizontal (173 cm<sup>3</sup>) se refiera a un tamaño equivalente al del soporte E-noise.

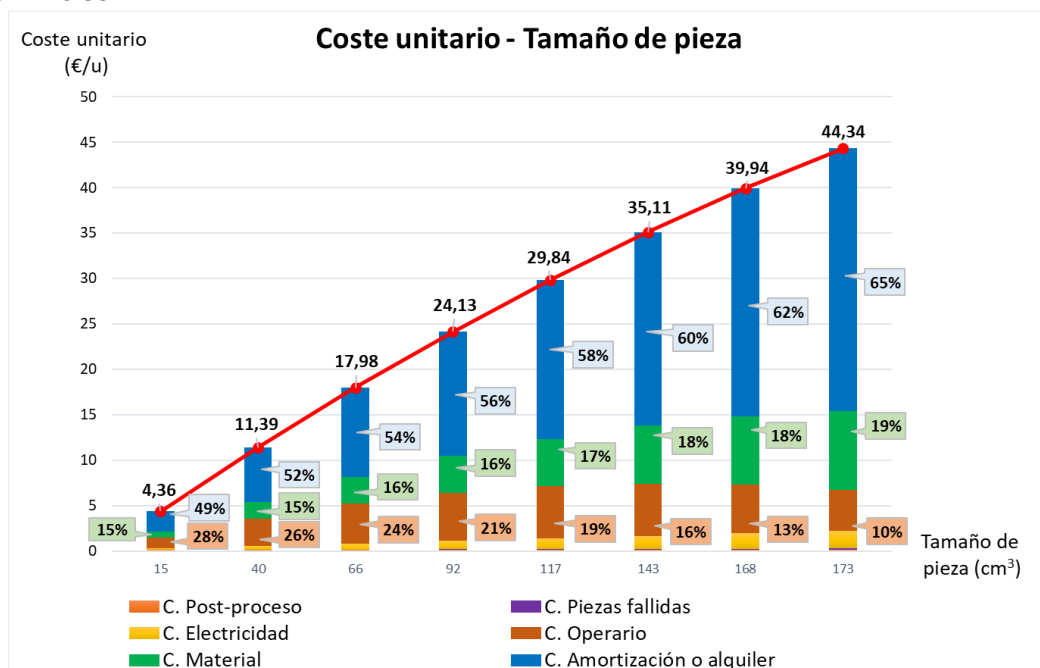


Fig. 5.4.a Gráfico representativo del coste unitario de piezas obtenidas por fabricación aditiva frente al tamaño de pieza y desglose de este coste en porcentajes.

Se puede comprobar que el tamaño de pieza afecta directamente al coste unitario puesto que a medida que aumenta el tamaño que ocupa la pieza, aumenta el coste unitario de la misma. Desglosando los factores que influyen en el coste unitario se observa que los que más contribuyen a este aumento de coste son: El coste de amortización o alquiler de la máquina y el coste del material.

A medida que el tamaño de pieza es más grande, estas ocupan más, por lo tanto, se pueden imprimir menos piezas en un mismo ciclo. Esto provoca que se deban hacer más ciclos para un volumen de tirada determinado. Mas ciclos equivale a más tiempo que se debe disponer de la máquina, lo que aumenta el coste unitario considerablemente. Respecto al aumento de coste por cantidad de material es sencillo, cuanto más grande es la pieza, más material necesitas para fabricarla.



### Relación: coste unitario - volumen de tirada - tamaño de la pieza

Uno de los datos que es útil en el momento de decidir con qué tecnología fabricar una pieza (fabricación aditiva o molde de inyección) es el número límite de volumen de tirada viable. Este número define el punto en el cual deja de ser rentable la fabricación aditiva y se prefiere utilizar molde de inyección. Dicho dato se estima en función del tamaño de la pieza.

En el siguiente grafico se observa la relación de coste unitario con el número de unidades prevista para piezas según la tecnología utilizada y el tamaño de piezas. Las líneas horizontales corresponden a los costes unitarios de piezas fabricadas por fabricación aditiva, concretamente MJF. Y las curvas corresponden a los costes unitarios según número de unidades previstas para piezas fabricadas por molde de inyección. Los colores definen los datos referidos a los distintos tamaños de piezas.

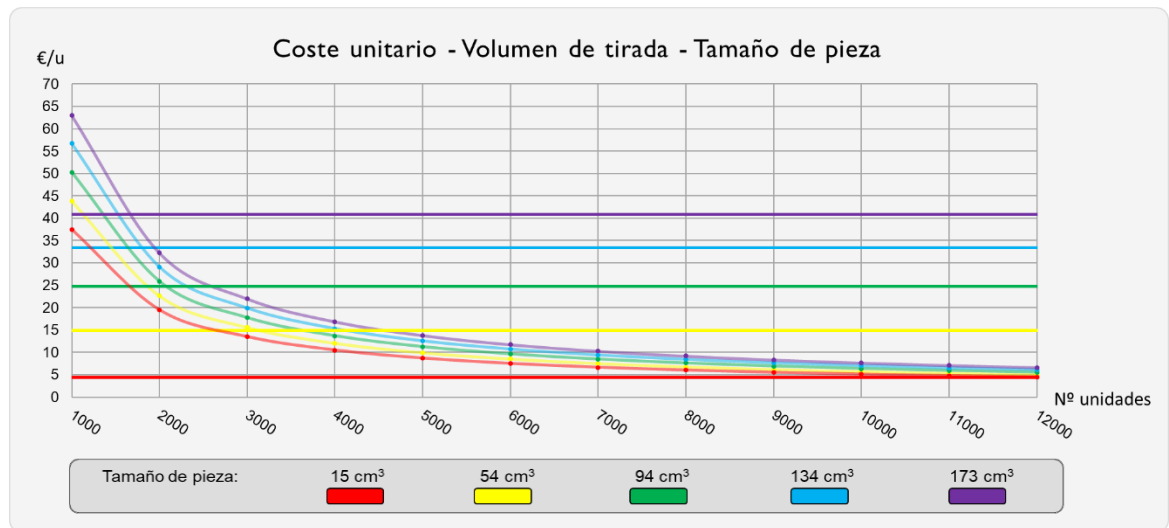


Fig. 5.4.b Gráfico general de coste unitario – volumen de tirada (N.º de unidades) para distintos tamaños de piezas

Para simplificar y obtener datos útiles respecto al grafico anterior, se estudian dos casos concretos. El primero de ellos es referente a piezas del mínimo tamaño posible (15 cm³) que equivale al tamaño de la pieza estudiada en este proyecto: soporte VIP Pedal. En el segundo caso se especifica los datos referentes al máximo tamaño de pieza expuesta (173 cm³) que equivale al tamaño del soporte E-noise.

Se obtiene el número límite de volumen de tirada en el punto en el que se cruza la línea referente a piezas de fabricación aditiva (MJF) y la curva de piezas de molde de inyección.

Para un tamaño de pieza de  $15 \text{ cm}^3$ , el volumen de tirada límite para el cual la fabricación aditiva es rentable respecto a la tecnología de molde de inyección es 11.000 unidades. Estos datos son válidos para piezas fabricadas con el material PA 12 de MJF. Se ha considerado que el coste de desarrollo y fabricación de un molde de inyección para una pieza de estas características equivale a 36.000 €.

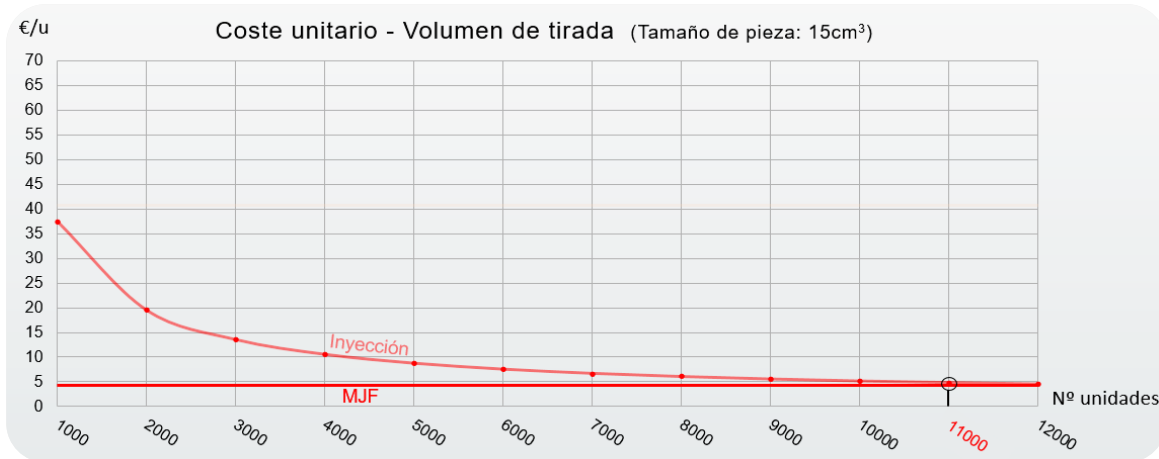


Fig. 5.4.c Gráfico específico de coste unitario – volumen de tirada (N.º de unidades) para un tamaño de piezas de  $15 \text{ cm}^3$ , equivalente a soporte VIP Pedal.

En el caso de un tamaño de pieza de  $173 \text{ cm}^3$ , el volumen de tirada límite es muy inferior al anterior, se trata de 1.650 unidades. Estos datos son válidos para piezas fabricadas con el material PA 12 de MJF. El coste de desarrollo y fabricación de un molde de inyección para una pieza de estas características se ha considerado que equivale a 61.500 €.

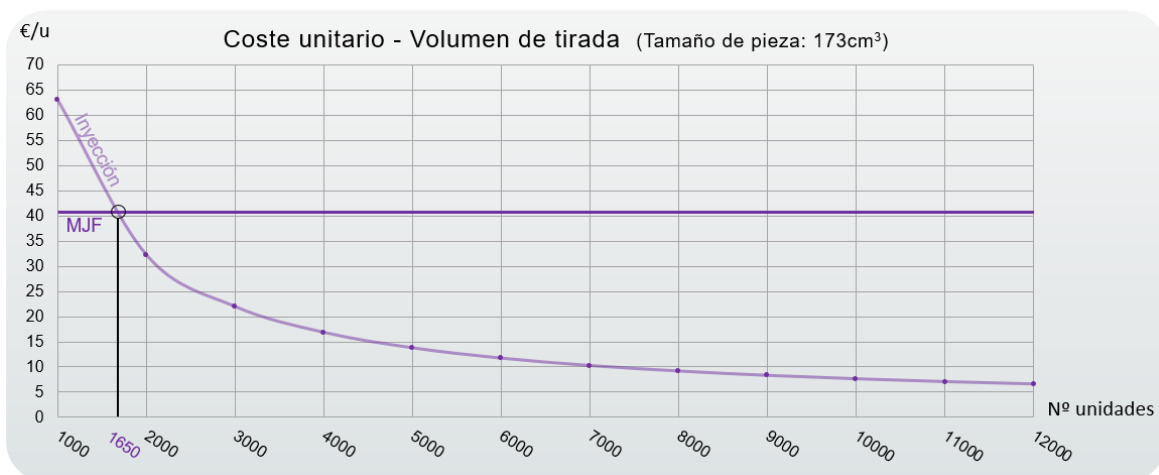


Fig. 5.4.d Gráfico específico de coste unitario – volumen de tirada (N.º de unidades) para un tamaño de piezas de  $173 \text{ cm}^3$ , equivalente a soporte E-noise.

## 6. Impacto del proyecto en SEAT

La posible implementación de una tecnología de fabricación aditiva en la empresa SEAT implica una serie de cambios y modificaciones con el ánimo de adaptarse a la fabricación de piezas del consorcio mediante esta tecnología.

A continuación, se detalla el impacto ambiental que ha supuesto el análisis de viabilidad de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva en SEAT. También se contempla el impacto que supondría en la fábrica de la empresa y en sus proveedores la implementación de la fabricación aditiva como método de producción para un determinado número de piezas.

### 6.1. Impacto ambiental

#### 6.1.1. Política medioambiental de SEAT

La implementación de cualquier proyecto en SEAT debe cumplir con una serie de requisitos estrictos que están especificados en la declaración de política medioambiental<sup>[12]</sup> definida por el Sistema de Gestión del Cumplimiento Medioambiental de la empresa, que sigue la normativa ISO 14.001. Este sistema es reconocido a nivel internacional y verificado por terceros, integra los requisitos medioambientales en los procesos empresariales y en la toma de decisiones. Además, los centros productivos de SEAT están certificados con el Sistema de Gestión Energética ISO 50.001.

La compañía es responsable de la mejora ambiental continua de sus productos, sus centros de producción y sus servicios. La mejora ambiental se centra especialmente en la eficiencia de los recursos, el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>, el aumento de la eficiencia energética y la minimización de emisiones contaminantes.

Los productos del grupo SEAT incorporan el Ecodiseño en la concepción de sus productos, la empresa comunica a sus clientes las mejoras ambientales que se han incorporado en el diseño de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 14006.

#### 6.1.2. Impacto ambiental del proyecto

En el transcurso del análisis de viabilidad de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva se ha realizado una serie de procesos que suponen un impacto para el medio ambiente. Entre estos procesos se encuentra la fabricación de piezas mediante las tecnologías MJF y SLA, y la ejecución de ensayos de vibración para verificar la resistencia de las piezas.

- Fabricación de piezas mediante la tecnología multi jet fusión:  
Supone un gasto de electricidad y material. También genera una serie de residuos.
  - Máquina de impresión 3D:  
El consumo medio de la máquina MJF 4200 de HP es de 10,5 kW, lo que no supone un gran consumo en relación con la maquinaria que se dispone en la fábrica SEAT: prensas en la sección de chapistería, mecanismo de la cadena de montaje y robots de soldadura, entre otros.
  - Material utilizado:  
En el proceso de fabricación de piezas mediante la máquina MJF se consume tanto el material polvo del cual se compone la pieza como de productos químicos que actúan como agentes de fusión y agentes de detalle.  
Los materiales en forma de polvo disponibles actualmente son PA 12, PA 12 GB y PA 11. Tanto PA 12 como PA 11 se consideran materiales fáciles de reciclar, concretamente el PA 12 porque no contiene aditivos y el PA 11 porque está hecho con aceite de ricino vegetal. En cambio, el PA 12 GF contiene partículas de vidrio y aditivos, lo que lo convierte en un material complejo de reciclar.  
Los productos químicos utilizados en el proceso de fabricación no son considerados como sustancias peligrosas, pero si es un producto altamente contaminante. Aun así, la máquina MJF 4200 de HP cuenta con la certificación REACH, es decir, cumple con el reglamento (CE) nº 1907/2006: Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de sustancias y mezclas químicas.
  - Transporte:  
El hecho de fabricar las piezas directamente en SEAT supone una reducción importante del impacto ambiental negativo respecto al transporte. En la actualidad, la mayoría de las piezas montadas en los vehículos se fabrican en empresas externas, y el transporte implica llevar piezas desde el lugar de fabricación (fábrica del proveedor) hasta el punto de ensamblaje (fábrica SEAT).
- Fabricación de piezas mediante la tecnología SLA:  
La fabricación de las piezas mediante estereolitografía se ha realizado en una empresa externa (Carbon3D). Por lo tanto, a parte del impacto ambiental provocado por la propia fabricación de las piezas, también se debe considerar el transporte de dichas piezas desde la ubicación de la empresa (Estados Unidos de América) hasta la ubicación del centro técnico de SEAT en Martorell.

➤ Máquina de impresión 3D:

El consumo medio de la máquina de estereolitografía es de 110 W, notablemente inferior al de MJF 4200 de HP. Se considera un consumo residual de energía en relación con el consumo de la producción a gran escala de la industria automovilística.

➤ Material utilizado:

Los materiales utilizados para la obtención del soporte VIP Pedal han sido: RPU 70 y RPU 130. Para la producción de piezas mediante esta tecnología se utilizan resinas líquidas. Estas resinas son consideradas como productos tóxicos en el momento de producción de la pieza, es decir, cuando se efectúa la polimerización. Este proceso puede provocar irritación de piel y el sistema respiratorio. Es un producto dañino cuando se expone a los ojos o se ingiere. Además, estas resinas son especialmente tóxicas para ecosistemas acuáticos.

- La realización de ensayos de vibración provoca un consumo de energía eléctrica. También supone una gestión de residuos adecuada una vez acabados los ensayos puesto que las piezas que han sido sometidas a estas pruebas deben ser retiradas del utillaje y lanzadas en el contenedor de plásticos del laboratorio de vibraciones.

## 6.2. Impacto en la fábrica de SEAT y proveedores

Puesto que este proyecto verifica que es viable utilizar la fabricación aditiva para introducir piezas con un tamaño determinado en vehículos de serie corta de la marca. Es posible que la empresa decida fabricar determinadas piezas mediante esta tecnología. Supondría que estas se obtendrían mediante máquinas de tipo MJF en un lugar cercano a la cadena de montaje.

Existen dos formas de implementar la fabricación aditiva en la fábrica de SEAT: Se puede ampliar el área dedicada a fabricación aditiva ya existente o contratar un proveedor para que lo fabrique de forma externa, pero en un lugar próximo a la fábrica.

En el caso de que se decida fabricar las piezas internamente en la empresa supone un aumento de puestos de trabajo. Se requiere personal especializado en fabricación aditiva. También es posible la reorganización de personal, ofreciendo la posibilidad de trabajar en esta área a la vez que se forma en este tipo de tecnología mediante cursos ofrecidos por la propia empresa.

Además, la decisión de fabricar piezas mediante esta tecnología también supone que los proyectistas que desarrollan estas piezas modifiquen su forma de diseñar. Actualmente los proyectistas desarrollan las piezas en base a las restricciones impuestas por los moldes de inyección. Con esta nueva forma de fabricar, estas restricciones de geometría ya no existen, hay más libertad en el diseño. Pero aun así es necesario que estos proyectistas conozcan bien cómo funciona la tecnología para diseñar las piezas de forma más eficiente. Por lo tanto, también se recomienda cursos de formación para los empleados que diseñan las piezas.

En el caso de que SEAT decida ceder la fabricación de piezas mediante tecnología de fabricación aditiva a empresas externas, estas se verían obligadas a invertir en esta tecnología para seguir compitiendo en el mercado. Es posible que empresas dedicadas a fabricar piezas pequeñas mediante molde de inyección deban parar parte de su producción y se readapten a la nueva tecnología puesto que en algunos casos es más rentable.

La empresa proveedora debería trabajar dentro de la fábrica SEAT o en sus inmediaciones, cargarían con el coste de la máquina de impresión, el material y la contratación de personal especializado.

## 7. Presupuesto del proyecto

El presupuesto del proyecto destinado a analizar la viabilidad de piezas obtenidas mediante la tecnología de fabricación por adición para ser introducidas en vehículos de serie corta de SEAT es el siguiente:

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDAD	Horas trabajadas (h)	Coste por hora (€/h)	Unidades (u)	Coste por unidad (€/u)	Coste (€)	Observaciones
Desarrollo del proyecto por parte del estudiante	352,0	3,7	*		1302,40	Coste por hora calculado en base a la remuneración por prácticas en la empresa
<b>Obtención de piezas utilizadas en el proyecto</b>						
<b>Soporte VIP Pedal</b>						
Adaptación de pieza para fabricación aditiva por parte de un proyectista de SEAT	3,5	55,0	*		192,50	Adaptar el CAD original a la geometría idónea para impresión 3D
Trabajo del operario de máquina de impresión 3D para piezas de MJF	6,0	37,5	*		225,00	Preparación de estación de procesado + realización del postproceso
<b>Fabricación de soporte VIP Pedal mediante MJF en SEAT</b>						
Soporte VIP Pedal PA 12	*		4	5,39	21,56	Pieza en orient. inclinada + postproceso
Soporte VIP Pedal PA 12 GB	*		4	5,86	23,44	Pieza en orient. inclinada + postproceso
<b>Fabricación de soporte VIP Pedal mediante SLA en Carbon3D</b>						
Soporte VIP Pedal RPU 70	*		4	35,00	140,00	Pieza sin postproceso
Soporte VIP Pedal RPU 130	*		4	35,00	140,00	Pieza sin postproceso
<b>Soporte E-noise</b>						
Adaptación de pieza para fabricación aditiva por parte de un proyectista de SEAT	6,5	55,0	*		357,50	Adaptar el CAD original a la geometría idónea para impresión 3D
Trabajo del operario de máquina de impresión 3D para piezas de MJF	1,0	37,5	*		37,50	Preparación de estación de procesado + realización del postproceso
Fabricación de soporte E-noise mediante MJF en SEAT	*		2	41,96	83,92	Se fabrican dos piezas de prueba para ver el resultado real, no se efectuará ensayos de vibración
Ensayos de vibración de los soportes VIP Pedal	60,0	45,0			2700,00	Tres piezas han completado el ciclo de 16h en eje Z y otra ha estado 12h en ejes X,Y,Z
<b>COSTE TOTAL DEL PROYECTO</b>					<b>5223,8</b>	

Fig. 7. Presupuesto del proyecto

Tras contar con los costes de desarrollo del proyecto por parte del estudiante, obtención de las piezas y ejecución de ensayos de vibración, se estima que el importe total que ha supuesto la realización de este proyecto es de 5.223,8 €.

## 8. Diseño generativo

El diseño generativo es una nueva ventana de investigación que se propone para continuar con este trabajo de final de grado.

El diseño generativo es un método empleado para generar geometrías de piezas a partir de inteligencia artificial y procesos automatizados. El objetivo es optimizar una pieza ya creada en programas CAD reduciendo la cantidad de material utilizada para fabricarla sin reducir sus propiedades mecánicas.

Para obtener una pieza con diseño generativo, se utiliza algoritmos matemáticos que definen una serie de reglas de diseño para crear formas complejas garantizando la función requerida. Se basa en una especie de prueba-error de cálculos numéricos fundamentado por un alto volumen de intentos, la mayoría de los cuales no serán provechosos. El sistema aprende de cada iteración lo que funciona y lo que no. Una vez el programa identifica las zonas donde la pieza va a sufrir esfuerzos mecánicos, solo añade material en ese lugar.

Es un sistema que permite introducir en la computadora qué requerimientos mecánicos debe cumplir la pieza en cuestión, ya sean parámetros o restricciones. La computadora es la encargada de encontrar una geometría que concuerde con los datos introducidos. El software buscará la opción más funcional y no la más simétrica o estética, por lo que también puede abrir nuevas fronteras en materia de diseño.



Fig. 8.1 Iteración de una pieza aplicando diseño generativo

El diseño generativo se utiliza únicamente en piezas que van a ser fabricadas mediante fabricación aditiva. No se utiliza en métodos tradicionales como la fabricación por molde de inyección porque para obtener piezas con geometrías tan complejas se requeriría un molde extremadamente elaborado, lo que supone un aumento de precio considerable y, por lo tanto, no sería rentable fabricar de esta forma.



Las ventajas que se identifican con esta nueva forma de diseño son la reducción de costes, peso y tiempo de fabricación. Las geometrías de piezas de este tipo tienen zonas donde no hay superficie, por lo tanto, se utiliza menos material para obtenerla, lo que implica que el peso total de la pieza es menor y que se reduce el coste puesto que se utiliza menos material. Con este tipo de diseño, y al obtenerse mediante fabricación aditiva, las capas se forman más rápidamente, lo que implica una reducción del tiempo total de fabricación.

Se ha realizado una simulación para obtener la geometría de diseño generativo de las dos piezas desarrolladas en SEAT que se han utilizado en este trabajo final de grado como referencia. Se trata del soporte VIP Pedal y del soporte E-noise.



Fig. 8.2 Soporte VIP Pedal (diseño original)

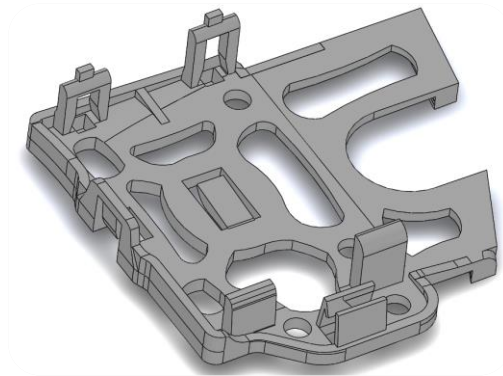


Fig. 8.3 Soporte VIP Pedal (diseño generativo)

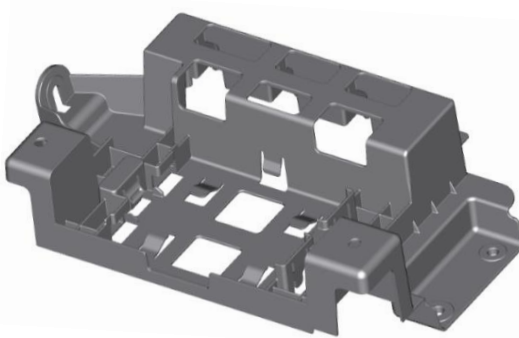


Fig. 8.4 Soporte E-noise (diseño original)

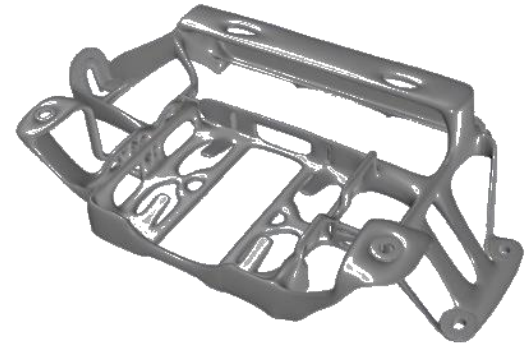


Fig. 8.5 Soporte E-noise (diseño generativo)

El proceso de conversión de la pieza original a el diseño generativo del soporte VIP Pedal esta detallado en el Anexo B. Se ha realizado en base al ensayo de vibración que debe superar la pieza para ser homologable.

## Conclusiones

Tras realizar un extenso análisis de viabilidad se puede afirmar que es factible producir únicamente un determinado tipo de piezas mediante fabricación aditiva para ser utilizadas en vehículos de serie corta de la empresa automovilística SEAT. Se ha comprobado que esta tecnología solo es viable para fabricar piezas no vistas y situadas en la zona interior del vehículo, que tengan un tamaño no superior a 15 cm<sup>3</sup> y que estén destinadas a series cortas de hasta 11.000 unidades. Se ha verificado mediante ensayos de vibración que estas piezas cumplen con los requerimientos mecánicos necesarios para ser homologables según la normativa del grupo Volkswagen. Concretamente, la tecnología que permite producir estas piezas de impresión 3D, de tamaño reducido con alta calidad y a un coste aceptable, es la multi jet fusion y el material óptimo la poliamida 12.

A lo largo del proyecto se ha visto que las ventajas que aporta la fabricación aditiva son muchas. Permite obtener piezas complejas en un corto plazo de tiempo y en distintos lugares del mundo a la vez. Se evita la necesidad de tener espacios para guardar stock y posibilita que los recambios de piezas nunca queden obsoletos. Da la opción al proyectista de comprobar si la pieza que está diseñando funciona adecuadamente en el vehículo antes de iniciar producción de todas las piezas, mediante prueba y error de prototipos. Admite la customización de piezas. En la actualidad, hay ciertos materiales y tecnologías con un grado de madurez suficiente como para fabricar piezas resistentes a esfuerzos mecánicos.

Aun así, es importante remarcar que actualmente esta tecnología únicamente es rentable para piezas de tamaño reducido incluidas en producciones de series cortas. Por lo tanto, hoy en día, se puede afirmar que la tecnología aditiva todavía no está preparada para asumir grandes volúmenes de producción. Para poder fabricar largas tiradas de piezas y ser competitivos frente a la fabricación tradicional de molde de inyección es necesario reducir el coste del material y ampliar el área de impresión de las máquinas. De esta forma se podrían fabricar más piezas por ciclo, reduciendo así el tiempo de fabricación y el tiempo invertido por el operario. Uno de los factores que más influye en el elevado coste unitario de las piezas es el coste de amortización o alquiler de la máquina.

Se concluye que una vez finalizado el proyecto se tiene una visión global de las tecnologías de impresión 3D disponibles y en desarrollo, así como de los materiales existentes en el mercado. Las propiedades de estos materiales para impresión 3D se recogen en una serie de tablas y gráficos que permiten su comparación frente a los utilizados en inyección. Otra aportación del proyecto es la unificación de costes en una única ecuación que permite calcular el coste unitario de piezas obtenidas por fabricación aditiva.

La tecnología de fabricación aditiva es la única que permite el diseño generativo de piezas. Se trata de un tipo de diseño con el que se reduce el consumo de material y el tiempo de fabricación manteniendo las prestaciones de la pieza. Con el diseño generativo se propone una nueva vía de investigación derivada de este proyecto.

## Agradecimientos

Me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer la implicación y experiencia aportada por parte del director de mi proyecto en SEAT, Mario Martínez Díaz. Por proporcionarme herramientas y conocimientos que me han ayudado durante la realización del trabajo. Asimismo, agradezco a mis compañeros en SEAT que han colaborado en los ensayos de vibración y en la obtención de las piezas mediante fabricación aditiva.

Por su orientación y atención durante el desarrollo del proyecto, mi grato agradecimiento al Dr. Xavier Ramis Juan, ponente del trabajo en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Sus consejos me han permitido darle un salto de calidad al proyecto. Agradecer también su disponibilidad en todo momento.

Por último, y no por ello menos importante, reconocer el apoyo moral de mis familiares y amigos. Por su respaldado incondicional durante el transcurso del proyecto final de grado.

## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] SEAT. *SEAT de un vistazo*. Martorell, 2018.

Recuperado de <https://www.seat-mediacycenter.es/companypages/seat-de-un-vistazo.html>, 3 de febrero de 2020.

- [2] SEAT. *Historia de SEAT*. Martorell, 2018.

Recuperado de <https://www.seat.es/sobre-seat/historia.html>, 3 de febrero de 2020.

- [3] HOLST, A. Estimación del volumen de mercado de impresión 3D entre 2013 y 2021.

Recuperado de <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/>, 5 de febrero de 2020.

- [4] CANTERO GUISÁNCHEZ, J.L., *Problemas resueltos de tecnología de fabricación*, Madrid: Paraninfo, 2005.

- [5] BANDYOPADHYAY A., BOSE S., *Additive Manufacturing*, Florida: CRC Press 2015.

- [6] CIM CENTRO ADSCRITO A UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. *Fabricación aditiva*. Barcelona, 2019.

Recuperado de <https://www.fundaciocim.org/es/fabricacio/fabricacio-additiva>, 4 de febrero de 2020.

- [7] ALL3DP. *SLA vs SLS – 3D Printing Technologies Compared*. Berlín, 2019.

Recuperado de <https://all3dp.com/2/sla-vs-sls-3d-printing-technology-shootout/>, 17 de febrero de 2020.

- [8] 3D HUBS. *HP MJF vs. SLS: A 3D printing technology comparison*. 2020.

Recuperado de <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/>, 2 de marzo de 2020.

- [9] 3D EXPERIENCE. *Material jetting - MJ, NPJ, DOD*. Vélizy-Villacoublay, 2018.

Recuperado de <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-jetting>, 27 de febrero de 2020.

- [10] 3D NATIVES. *Impresión 3D de metal*. París, 2019.

Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/guia-impresion-3d-metal/>, 18 de febrero de 2020.

- [11] DONDONG GU, *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*, China: Springer, 2015.

- [12] SEAT. *Declaración de Política Medioambiental de SEAT*. Martorell, 2020.

Recuperado de <http://miseat.seat.vwg/content/my-seat/entornosDeTrabajo/medio-ambiente.html?seccionPage=politica-ambiental>, 5 de junio de 2020.

## Bibliografía complementaria

HOUGH M.C., DOLBEY R., *The Plastics Compendium: Key properties and sources*, Shawbury: Rapra Technology LTD, 1995, p. 87-123.

WHITE G., *Introducción al Análisis de Vibraciones*: Azima DLI, 2010.

RONCORONI OSIO U., *Manual de diseño generativa*: Universidad de Lima, 2017.

